دكتور مهندس
كاميليا يوسف محمد

التوافقيات

فى الشبكات الكهربائية

The Harmonics In Electrical Networks

I_D

I_Y

1

2

3

التوافقيات

فى الشبكات الكهربائية

The Harmonics In Electrical Networks

دكتور مهندس

كاميليا يوسف محمد

طبعة اولى	ابريل ١٩٩٤
طبعة ثانية	مارس ١٩٩٨
طبعة ثالثة	مايو ٢٠٠١
طبعة رابعة	مارس ٢٠٠٥

تصميم الغلاف :

م / أحمد طه هاشم

بسم الله الرحمن الرحيم

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمـــة

ادى التقدم السريع فى استخدام الكترونيات القوى ، فى الصناعة ، والتزايد المستمر للاحمال الصناعية غير الخطية الى تشوه الموجات الكهربائية بصورة ملحوظة ، وقد اطلق بعض الباحثين على تشوه الموجات بالموجات الكهربائية "الملوثة" اى تلوث الموجة النقية بالتوافقيات .

وقد تعرض الكتاب الى التعريف بالتوافقيات وتحليل الموجات ـ مصادر وتأثير التوافقيات ـ حسابات المعاوقة الكلية للشبكة ـ الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكات الكهربائية ـ قياس التوافقيات ـ المرشحات وتصميماتها .

ولايفوتنى ان اتقدم بالشكر للسيد المهندس / أحمد مصطفى المفتى رئيس مجلس الادارة والعضو المنتدب على موافقة سيادته لاخراج هذا العمل لحيز الوجود . وقد وافق سيادته على طباعة الكتاب على نفقة الشركة بمطبعة العدل التى قامت بجهد مشرف فى طباعته واخراجه على هذا النحو .

الحمد لله الذى اعاننى على عمل هذا الكتاب ، والذى يهم جموع المهندسين ، وارجو من الله سبحانه وتعالى ان اكون قد وفقت فى ذلك .

وفقنا الله جميعاً إلى مافيه خير بلدنا وصلى اللهم على سيدنا محمد وعلى صحبه وسلم .

د. كاميليا يوسف محمد

ابريل ١٩٩٤

الفهـــرس

الباب الأول

التوافقيات فى الشبكات الكهربائية

مقدمة :

بدأ العلماء فى التفكير فى مشاكل التوافقيات كمصدر متاعب للشبكات الكهربائية منذ أواخر عقد ١٩٢٠ ، وذلك عندما توصلوا الى وجود تشوهات فى موجات الجهد والتيار بخطوط النقل الكهربى ، وتركز التفكير على الآلات المتزامنة والتأثيرية كمصدر للتوافقيات وتأثيرها على خطوط التليفونات بالإضافة الى الانهيارات الحادثة فى مكثفات القدرة .

وقد سجلت الملاحظات الآتية على الابحاث الأولية لخط نقل ٢٢٠ ك.ف بطول ٢٥٠ ميل :

١ - وجد ان القوة الدافعة الكهربائية *(emf)* ، عند جانب الارسال *(Sending end)* والمحتوية على توافقية ثالثة بقيمة ٧ ٪ ، تصبح قيمة التوافقية الثالثة ٥٣ ٪ ، عند جانب الاستقبال *(Receiving end)* .

٢ - تقل التوافقية الثالثة ، عند جانب الاستقبال ، وفى حالة الحمل الكلى من ٥٣ ٪ الى ٢٩ ٪ .

٣ - يكون معامل القدرة ٠,٨٤٨ للموجات المحتوية على توافقيات ، عند الجانب المتصل مع المولدات ، (يكون معامل قدرة الموجات الجيبية النقية ٠,٩٦).

٤ - يكون معامل القدرة ٠,٨٢ ، عند الحمل ، إذا كانت الموجة جيبية نقية عند الارسال .

٥ - تلاحظ على المحركات التأثيرية ، المركبة فى ذلك الوقت (حوالى ١٩٣٠) ان بها اهتزازات *(Vibrations)* ، وتصدر أصوات خشنة دورية *(Periodic rasping sounds)* .

ومنذ ذلك الحين بدأ الاهتمام بدراسة مصادر ومشاكل وكيفية التغلب على التوافقيات بالشبكات الكهربائية .

وقد تطورت صناعة الآلات المتزامنة والتأثيرية تطوراً كبيراً للتغلب على حدوث

توافقيات بالشبكات الكهربائية وقد أمكن تقليل التوافقيات وأحياناً إلغاؤها عن طريق المجموعة الاتجاهية *(Vector group)* لمحولات القدرة والتى تقلل مركبات التتابعية الصفرية للتوافقيات *(Zero-sequence harmonics)* والتى تعتبر كمرشحات فى مسارين *(Two-way)* لحماية شبكتى المصدر وتغذية الاحمال .

فى الخمسين سنة الماضية ، أستخدمت اليكترونيات القوى *(Power electronics)* بتوسع فى أغراض مختلفة منها :

- أجهزة التحكم فى صناعات متعددة مثل : التعدين ـ تشغيل وتشكيل المعادن ـ التكرير ـ النسيج...
- أجهزة التحكم لتشغيل أفران القوس الكهربى سواء بالمقاومات أو الاشعة تحت الحمراء .
- أجهزة التحكم فى المحركات .
- الحاسبات الآلية وأجهزة تحليل البيانات ...

وتتسبب إليكترونيات القوى فى زيادة كبيرة فى الاحمال غير الخطية *(Non-linear)* الموصلة على الشبكة الكهربائية ، ومن خصائص هذه الاحمال أنها تستهلك تيارات مشوهة بدرجة ملحوظة ، أى أنها تحتوى على توافقيات ، تؤدى إلى تشوه فى شكل موجات الجهود .

ويصاحب وجود التوافقيات احتمال حدوث رنين *(Resonance)* فى الدائرة الكهربائية خاصة اذا وجدت فى الشبكة مكثفات تعويض ، والتى تؤدى بدورها إلى تكبير التوافقيات لدرجة خطيرة ، مما قد ينشأ عنه زيادة فى التحميل على الآلات الدوارة ومكثفات التعويض الموصلة على الشبكة الكهربائية وتؤثر هذه التوافقيات على أجهزة الاستقبال المركزية لاشارات التحكم عن بعد للشبكة كما أنها تؤدى إلى زيادة المفقودات وسخونة الآلات وانهيار العزل الكهربى للمعدات والكابلات ...

ويختلف تأثير التوافقيات تبعاً للنقاط الآتية :

- طبيعة مصادر التوافقيات بالشبكة .
- أماكن المعدات المصدرة للتوافقيات على الشبكة الكهربائية .

- خصائص الشبكة الكهربائية ومكوناتها .

تحليل "فورير" لموجات التيار والجهد

يفترض أن تكون التيارات والجهود المترددة المتولدة ، من الناحية النظرية ، عبارة عن موجات جيبية نقية *(Pure sine waveform)* ، وذلك لتبسيط العمليات الحسابية ، كما يتم من الناحية العملية تصميم المولدات للحصول على موجات جيبية مثالية بقدر الامكان ، وقد وجد رغم احتياطات التصميم ان الموجات تحتوى على بعض التوافقيات الفردية *(odd harmonics)* وتصبح الموجه مشوهة وعندئذ تعرف بالموجة المركبة *(Complex wave)* ، ويمكن اهمال هذه التوافقيات اذا كانت موجودة بقيم صغيرة جداً ، وتحدث التشوهات فى موجات الدوائر المحتوية على معدات لاخطية مثل : الموحدات *(Rectifiers)* ، لمبات التفريغ *(Discharge lamps)* ، القلب الحديدى المشبع *(Saturated iron core)* ....

وتعتبر موجات التيارات والجهود المترددة *(a.c)* دوال دورية *(Periodic)* فى الزمن ، كما فى الأشكال (١-١) ، (٢-١) ، (٣-١) ، ويعبر عنها بالمعادلة $y = f(t)$. وتتغير الاشارة (من الموجب الى السالب او العكس) للتيار والجهد المتردد عدة مرات خلال الدورة الواحدة *(cycle)* ، كما يكون عدد مرات التغيير فى الاشارة عادة زوجيـاً ، واقل عدد هـو ٢ .

وتكون الدالة y موجة مترددة نقية اذا تحققت المعادلة الآتية

$$\int_0^T y\, dt = 0$$

اى ان المساحة تحت المنحنى الموجب والسالب خلال الدورة تساوى صفر وتكون خصائص الموجة النقية كالآتى :

$$T_1 = T_2 = T / 2$$

$$y\,(t + T / 2) = -y\,(t)$$

أى أن الجزء السالب للموجة يماثل الجزء الموجب ومزاح إلى اليسار أو الى اليمين بالقيمة $T/2$

حيث :

T_1: الفترة الموجبة لدورة واحدة

T_2: الفترة السالبة لدورة واحدة

T: طول فترة الدورة

f : التردد ويساوى $(1/T)$

وتكون الصورة العامة للدالة الدورية *(Periodic function)* المركبة ، غير جيبية ، كالآتى :

$$y = f(x)$$

ويشترط ان تكون الزاوية المرحلية للدورة تساوى 2π لامكانية كتابتها رياضاً على شكل دالة مثلثية *(Trigonometrical)* ، كما فى شكلى (٢-١) ، (٣-١) وتحلل الدالة الدورية باستخدام تحليل فورير *(Fourier)* إلى

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin (nx + \Phi_n) \ .... \ [1] \ .$$

حيث a_0 = قيمة مركبة التيار المستمر *(d.c component)*

a_n = قيمة مركبات التوافقيات .

n = درجة التوافقية .

a_1 = قيمة المركبة الأساسية *(Fundamental component)*

a_2 = قيمة مركبة التوافقية الثانية *(2nd harmonic component)*

a_3 = ...

ويلاحظ ان a_0 كمية غير دورية *(not periodic)*

ويكون تردد التوافقية رقم n يساوى n مرة من التردد الأساسى ، اى ان

$$f_n = nf$$

حيث

f_n تردد التوافقية n

f تردد الشبكة الكهربائية .

ويوضح شكل (١-٤) موجة اساسية وموجات التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة بينما يوضح شكل (١-٥) الموجة الاساسية وموجات التوافقيات الثانية والثالثة والخامسة وتردداتها وتكتب المعادلة رقم *[1]* على إحدى الصور الآتية :

$$y = f(x) = B_0 + B_1 \cos nx + B_2 \cos nx + \ldots\ldots$$
$$+ A_1 \sin nx + A_2 \sin nx + \ldots\ldots\ldots \qquad [2]$$

or

$$y = f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin nx \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots [3]$$

or

$$y = f(x) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin nx \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots [4]$$

حيث :

$$A_n = a_n \cos \Phi_n$$
$$B_n = a_n \sin \Phi_n.$$
$$\tan \Phi_n = \frac{B_n}{A_n}$$

ويستخدم تحليل "فورير" لتحليل موجات التيار والجهد لتحديد التوافقيات بهما وعند استخدام المعادلة رقم *[4]* وبالتعويض بالآتى

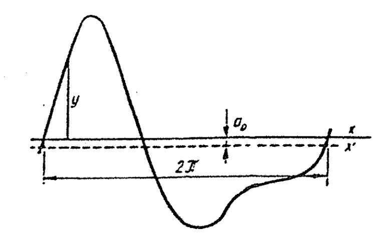
$$x = \omega t$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \text{Fundamental angular frequency}$$

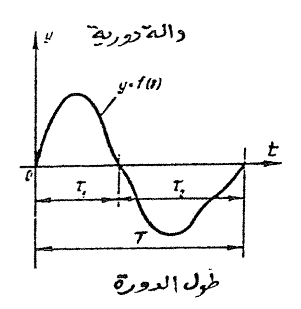
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

نحصل على

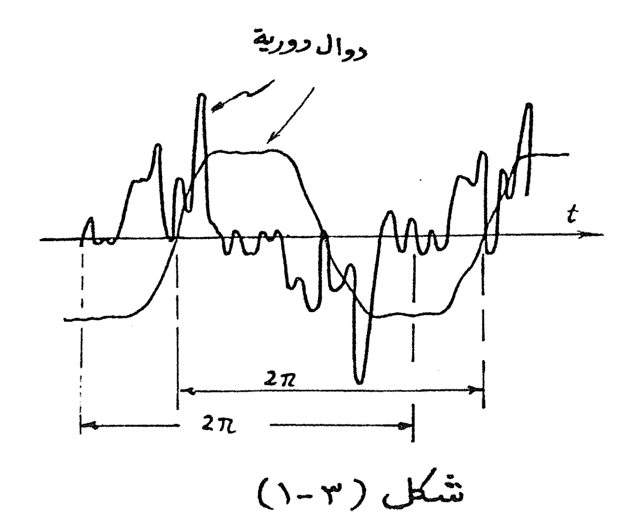
$$B_o = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)\, dt$$



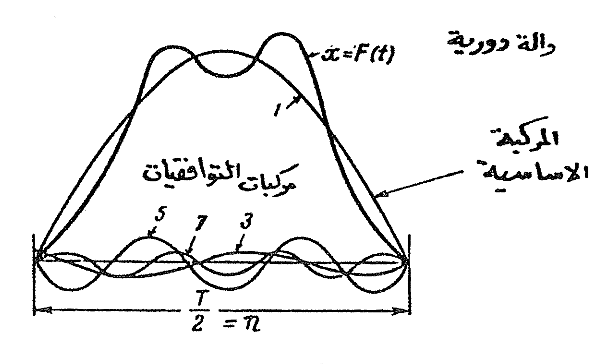
شكل (٢ - ١)



شكل (١ - ١)



شكل (٣ - ١)



شكل (٤ - ١)

$$f(t) = B_0 + B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + \ldots + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + \ldots$$

$$f(t) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\omega t$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin n\omega t \, dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos n\omega t \, dt$$

وتكون B_0 مساوية للمساحة تحت الموجة ، موضوع التحليل ، مقسومة على فترة الدورة ، وبمعنى آخر أن B_0 هى القيمة المتوسطة *(average)* للدالة

وتكون المركبة الاساسية للموجه تساوى

$$\text{Fundamental component} = B_1 \cos \omega t + A_1 \sin \omega t$$

ومركبات التوافقيات للدرجة n تساوى

$$n^{th}\text{ - harmonic component} = B_n \cos n\omega t + A_n \sin n\omega t$$

ويمكن تصنيف الموجات بشكل عام . إلى :

أ - الموجه الموضحة بشكل (٦-١)أ والتى يكون نصفها الاول صورة مرآوية *(mirror image)* للنصف الثانى للموجه وتخضع للمعادلة

$$-f(x) = f(x+\pi)$$

تتحقق هذه المعادلة بالشرطين التاليين :

$$-\sin nx = \sin(nx + n\pi) = (-1)^n \sin nx$$

$$-\cos nx = \cos(nx + n\pi) = (-1)^n \cos nx$$

وتتحقق المعادلتين السابقتين ايضاً ، عندما تكون n عدد فردى *(odd)* وعلى ذلك فان المنحنى بشكل (٦-١) أ منحنى دورى يحتوى فقط على توافقيات فردية .

ب - الموجه الموضحة بشكل (٦-١) ب ، والتى تكون متماثلة حول نقطة الاصل للمحاور وتخضع للمعادلتين الآتيتين :

$$f(-x) = -f(x) \quad \text{and}$$

$$f(2\pi - x) = -f(x)$$

وتتحقق هاتين المعادلتين فقط اذا كانت الموجه الاساسية (المعادلة رقم ٤) تحتوى على المركبات الجيبية فقط *(sine)* سواء كانت فردية *(odd)* او زوجية *(even)* .

وعلى ذلك فان المنحنى بشكل (٦-١) ب منحنى دورى يحتوى فقط على مركبات التوافقيات الجيبية *(sine harmonic)* .

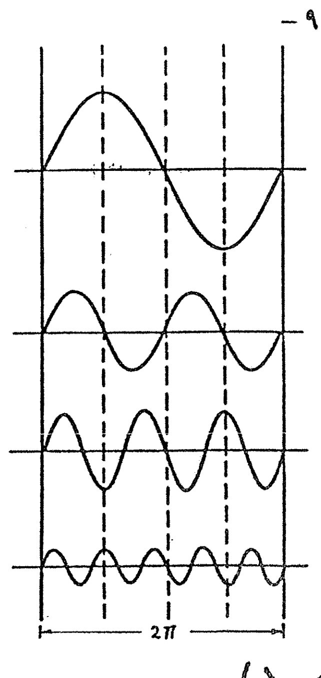
جـ - الموجه الموضحة بشكل (٦-١) جـ والتى تكون متماثلة حول نقطة الاصل للمحاور وايضاً متماثلة عند الموضع $x = \pi/2$ (او نصف الموجه الاول صورة مرآوية للنصف الثانى) . ويكون هذا المنحنى دورى ويحتوى على مركبات التوافقيات الجيبية الفردية *(odd sine harmonics)* .

وتعرف الاشكال الموضحة بشكل (٦-١) أ،ب،جـ بالموجات المشوهه *(distorted waves)* او بالموجات المركبة *(Complex waves)* والتى تحلل الى عدة موجات جيبية نقية لها ترددات وقيم مختلفة ويكون للموجه الرئيسية نفس تردد الموجه المركبه وتسمى بالموجه الاساسية *(Fundamental)* وباقى الموجات تمثل مركبات التوافقيات التى تحتويها الموجه المركبة .

يوضح شكل (٧-١) أمثلة لتحليل بعض الموجات المركبة الى موجة أساسية ومركبات التوافقيات ، فمثلاً فى شكلى (٧-١)أ ، ب تتكون الموجة الرئيسية المركبة من موجة أساسية ومركبة التوافقية الثانية ويلاحظ فى شكل (٧-١) ب ان مركبة التوافقية الثانية تتأخر عن الموجه الاساسية بزاوية ٤٥° وتكون موجتا النصف دورة مختلفتان فى كل من الموجتين بشكلى (٧-١) أ،ب . كما تظهر موجة مركبة فى شكلى (٧-١) جـ ، ءوهى عبارة عن موجة أساسية ومركبة التوافقية الثالثة ، وتتأخر مركبة التوافقية الثالثة بزاوية ٣٠° عن الموجة الأساسية وذلك بشكل (٧-١) ء . ويوضح شكل (٧-١) هـ موجة مركبة عبارة عن موجة أساسية ومركبة التوافقية الخامسة ، كما نجد فى شكل (٧-١) و موجة مركبة من موجة أساسية ومركبتى التوافقية الثالثة والخامسة .

نستخلص من ذلك أن الموجة المركبة تتركب من مركبة اساسية ومركبات التوافقيات الفردية *(odd)* اذا كان نصفا الموجة المركبة (الموجب والسالب) متماثلتين *(identical)* ، بينما اذا كان نصفا الموجة المركبة مختلفتين ، فانها تحتوى على مركبة اساسية ومركبات التوافقيات الزوجية *(even)* فقط .

كما فى النظام الاحادى الوجه ، تحدث التوافقيات فى النظـام الثلاثى الاوجـه ولكن



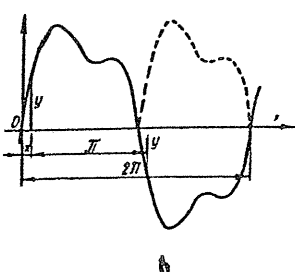
الموجة الاساسية
وترددها $f = 50\ Hz$

مركبة التوافقية الثانية
وترددها $f_2 = 2f = 100\ Hz$

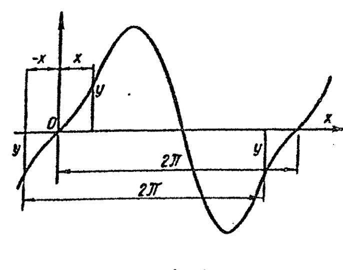
مركبة التوافقية الثالثة
وترددها $f_3 = 3f = 150\ Hz$

مركبة التوافقية الخامسة
وترددها $f_5 = 5f = 250\ Hz$

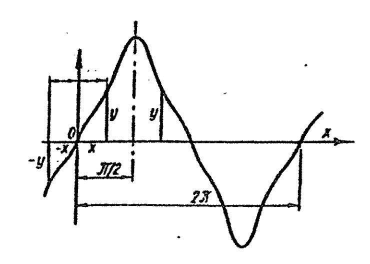
شكل (٥-١)



(أ)



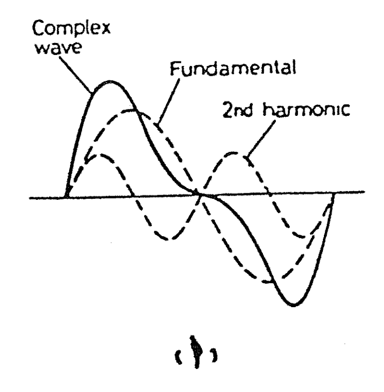
(ب)



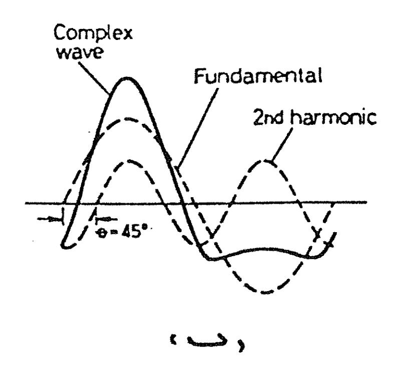
(حـ)

شكل (٦-١)

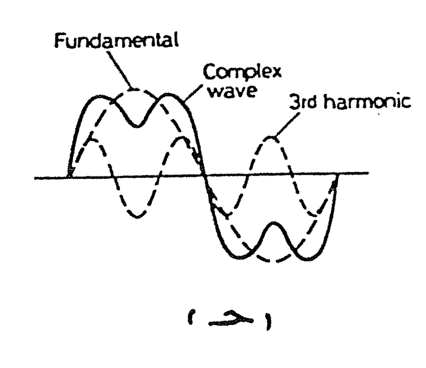
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



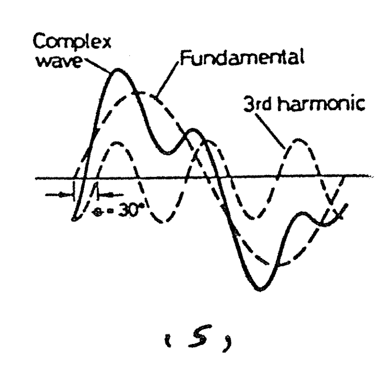
(أ)



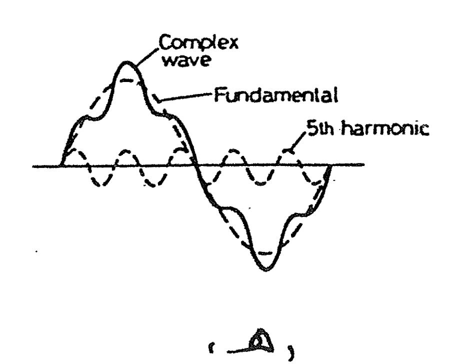
(ب)



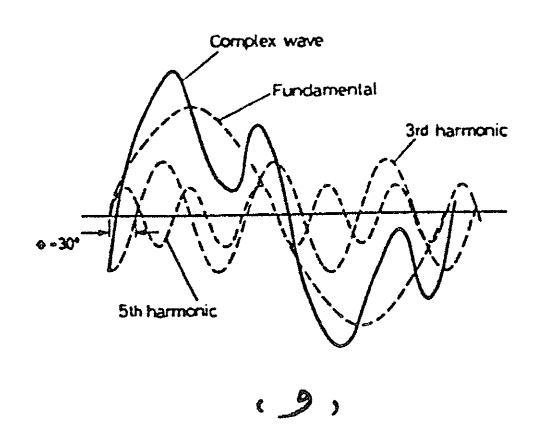
(جـ)



(د)



(هـ)



(و)

شكل (٧-١)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

لايحتوى على توافقيات زوجية ، وغالباً تكون التوافقيات الفردية مضاعفات الثلاثة (الثالثة ، التاسعة ....) ولكن الاكثر شيوعاً هى التوافقية الثالثة ، وكمثال نجد فى شكل (٨-١) الموجات الاساسية للثلاثة أوجه A,B,C لنظام ثلاثى الاوجه ، وتوجد زاوية اختلاف ١٢٠° بين كل وجهين ، وكل موجه تحتوى على التوافقية الثالثة ولاتوجد زاوية اختلاف بين موجات التوافقية الثالثة للثلاثة أوجه ، وعلى ذلك تكون موجات التوافقية الثالثة متساوية وفى اتفاق مرحلى للثلاثة اوجه لنظام متزن .

ويكون النظام الثلاثى الاوجه ، عادة ، اما متصل على شكل نجمة *(Star)* ، (ثلاثة اسلاك *Three wire*) ، أو نجمة تحتوى على أربعة أسلاك *(Four-wire)* أو أخيراً متصل على شكل دلتا *(Delta)* .

ويوضح شكل (٩-١) أ توصيلة نجمة / ثلاثة أسلاك لنظام ثلاثى الاوجه جهد كل وجه عبارة عن مركبة اساسية ومركبة التوافقية الثالثة .

وحيث ان مركبة التوافقية الثالثة فى كل وجه تكون متساوية وفى اتفاق مرحلى مع بعضها فان فارق الجهد للتوافقية الثالثة بين اى وجهين يساوى صفر ، فمثلاً لحساب فرق الجهد بين الوجهين A,B فان الجهد الناتج من وجود المركبة الاساسية يكون

$$V_{AB} = V_A - V_B = 1.73\ V_A$$

والجهد الناتج من وجود مركبة التوافقية الثالثة يكون

$$V_{AB3} = V_{A3} - V_{B3} = 0$$

لان V_{B3} , V_{A3} متساويان فى القيمة وفى اتفاق مرحلى .

معنى ذلك ان فى التوصيل نجمة / ثلاثة أسلاك يكون الجهد بين أى وجهين (جهد الخط) عبارة عن المركبة الاساسية فقط ، ولاتظهر مركبة التوافقية الثالثة فى جهد الخط *(Line voltage)* ، كما لاتظهر جميع التوافقيات الفردية التى تقبل القسمة على ثلاثة .

نجد فى النظام ثلاثى الاوجه الموصل نجمة / اربعة أسلاك أن التوافقية الثالثة الموجودة فى النظام ، تظهر فى جهد الوجه *(Phase voltage)* ، وتؤدى إلى ظهور مركبة التوافقية الثالثة للتيار والتى تكمل مسارها فى توصيلة النجمة للحمل الموصل على مصدر التغذية أو من خلال سعوية الارضى للشبكة ، كما فى شكل (٩-١) ب . واذا كان

الحمل متزناً فان المركبة الاساسية للتيار لاتتسبب في مرور تيار فى سلك التعادل (*Neutral wire*) ، بينما تكون مركبة التوافقية الثالثة للتيار فى الثلاثة اوجه فى اتفاق مرحلى مع بعضها لذلك يمر بسلك التعادل تيار تصل قيمته الى ثلاثة امثال مركبة التوافقية الثالثة للتيار المار بالوجه .

فى شكل (٩-١) ب اذا كانت قيمة سعوية الارضى كبيرة ، فإنها تؤدى إلى حالة الرنين (*resonance*) ، وذلك اذا كان التردد الطبيعى (*Natural frequency*) للنظام نتيجة توزيع التيار بالشكل ، ثلاثة امثال تردد النظام (*System frequency*) او مضاعفاتها .

فإذا كان النظام الثلاثى الاوجه موصلاً على شكـل دلتـا (*delta*) ، كما فـى شكـل (١٠-١) أ وكانت موجة الجهد تحتوى على التوافقية الثالثة ، وحيث انها متساوية القيمة وفى اتفاق مرحلى مع بعضها ، فى الثلاثة اوجه ، فانها تتسبب فى مرور تيار التوافقية الثالثة داخل الدلتا ولايظهر تأثيرها على اطراف مخرج الجهد ، وذلك فى حالة اتزان النظام فقط ، ويؤدى مرور التوافقية الثالثة داخل الدلتا الى :

- زيادة المفقودات .
- سخونة الملفات .
- تشوه المجال المغناطيسى الرئيسى .

اما إذا أخذنا فى الاعتبار توصيلة الزجزاج (*Zigzag*) الموضحة فى شكل (١٠-١) ب ، على ان تكون الجهود الاساسية للجزئين المكونين لكل وجه بينهما زاوية ٩٠° ، وعلى ذلك فإن التوافقية الثالثة ، تبعاً لشكل (١٠-١) ب ، تكون مزاحة بزاوية ٣×٩٠° =١٨٠° وعلى ذلك فان كل منهما فى اتجاه مضاد مع الاخرى وتلغيها فلا تظهر فى الدائرة الخارجية ، وبذلك فان هذه التوصيلة تناسب التأريض المباشر لنقطة التعادل .

وفى المحولات ذات التشبع المعتدل (*Moderate saturation*) فان التوافقيات الخامسة و السابعة تحدث تأثير بالقلب وتشوه تيارات المغنطة وتمر هذه التيارات بالشبكة الكهربائية ، وتشكل كل توافقية نظام ثلاثى الاوجه ، وعلى سبيل المثال اذا وصلت ملفات متصلة نجمة مع ملفات متصلة دلتا او زجزاج فان جهود هذه النظم تكون فى اتجاه مضاد وبناء على ذلك فانه من الممكن حدوث تعويض لتيارات التوافقيات العاليه للشبكة

الخارجية المتصلة بالملفات عن طريق توصيل ازواج من المحولات المتعددة ذات التوصيلات المختلفة ، فمثلاً يوضح شكل (١١-١) أ توصيلة ملفات نجمة وأخرى دلتا ، بينما يوضح شكل (١١-١) ب تيارات المغنطة بالتوصيلتين نجمة (I_y) والدلتا (I_Δ) ، وكذلك مجموع التيارين $(I_{Y+\Delta})$ بالشبكة والذى يكون غالباً خالياً من اى توافقيات .

ونستخلص من ذلك فى حالات التوصيل المختلفة لملفات ثلاثية الاوجه (النجمة - الدلتا - الزجزاج) لنظام ثلاثى الاوجه ، لا تظهر مركبة التوافقية الثالثة فى جهود الخط بينما يمكن ان تظهر باقى التوافقيات الاخرى او بعضها .

معادلة الجهد باستخدام تحليل "فورير"

من المعادلة رقم (1) يمكن كتابة معادلة الجهد باستخدام تحليل فورير كالآتى :

$$v = V_0 + V_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + V_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots\dots\dots$$

$$= V_0 + \sum_{n=1}^{n} V_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \qquad (5)$$

حيث

V_o = المركبة الثابتة للجهد *(Constant voltage component)*

وتساوى متوسط قيمة الجهد *(mean)* للدورة .

V_{nm} = قيمة الذروة *(Peak)* لموجة جهد التوافقية من الدرجة n .

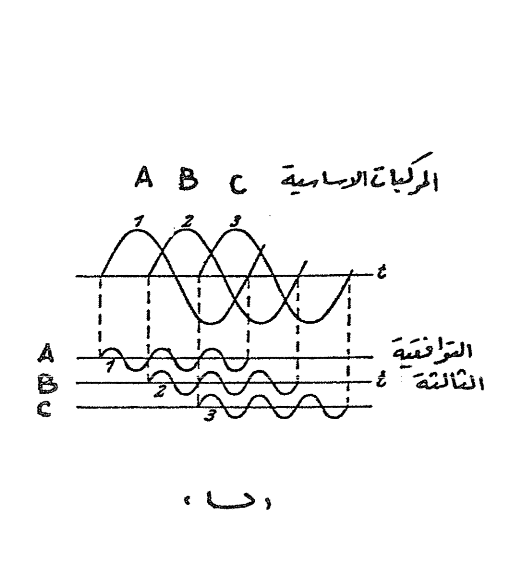
n = درجة التوافقية

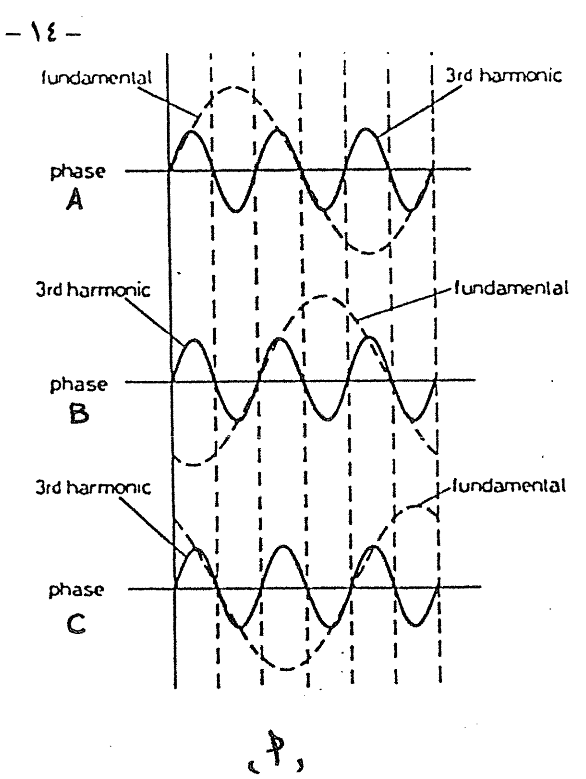
ϕ_n = زاوية البداية والتى تعتمد على قيمة المركبة عند نقطة بداية الزمن $(t=0)$

معادلة التيار باستخدام تحليل "فورير"

من المعادلة رقم $[1]$ يمكن كتابة معادلة التيار باستخدام تحليل فورير كالآتى

$$i = I_0 + \sum_{n=1}^{n} I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n - \Psi_n) \qquad (6)$$

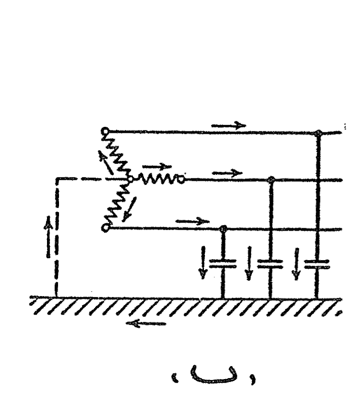


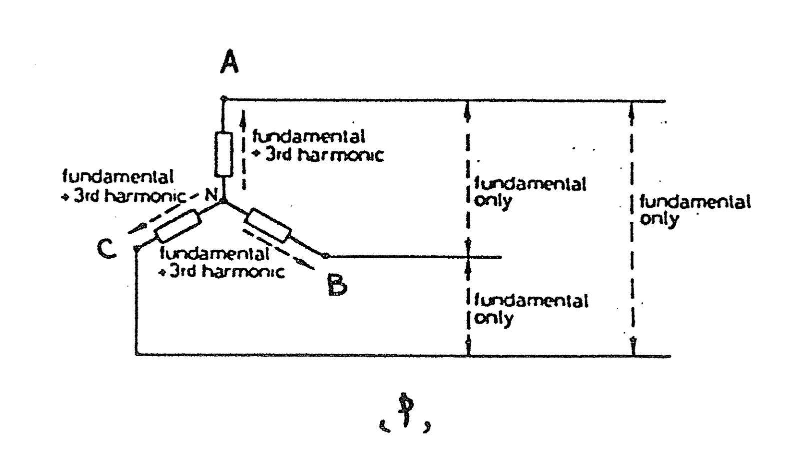


« ب »

« أ »

شكل (١-٨)



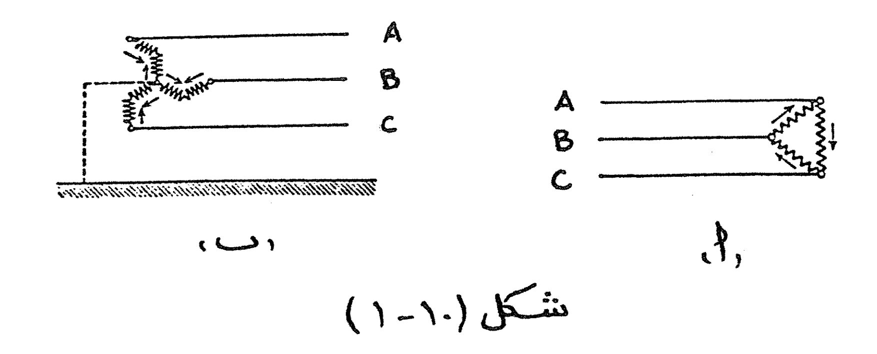


« ب »

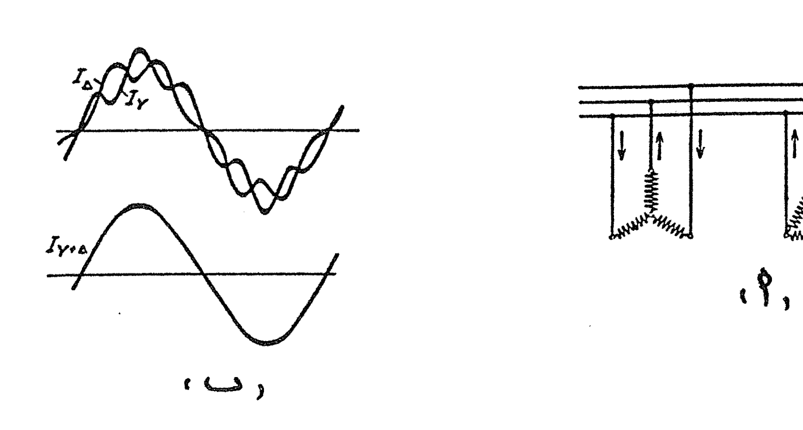
« أ »

شكل (١-٩)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



شكل (١٠-١)



شكل (١١-١)

حيث :

I_0= المركبة الثابتة للتيار والتى نحصل عليها باستخدام المركبة الثابتة للجهد V_0

I_{nm} = قيمة الذروة *(Peak)* لموجة تيار التوافقية من الدرجة n .

Ψ_n = زاوية الازاحة بين مركبة الجهد والتيار للدرجة n .

وباستخدام دائرة مبسطة كما فى شكل (١٢-١) أ وقد تم تمثيل الحمل بالمقاومتين R_2 , R_1 والملف L والمكثف C فان :

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0}$$

حيث R_0 المقاومة المكافئة للدائرة ، ومن الشكل (١٢-١) أ فان

$$R_0 = R_1 + R_2$$

وتكون قيمة الذروة لموجة تيار التوافقيات

$$I_{nm} = \frac{V_{nm}}{Z_n}$$

حيث :

Z_n معاوقة التيار عند التردد الزاوى $n\omega$.

وتكون زاوية الازاحة Ψ_n

$$\tan \Psi_n = \frac{X_n}{R_n}$$

$$Z_n = R_n + j\,X_n$$

باستخدام الدائرة بالشكل (١٢-١) أ فان

$$R_n = R_1 + \frac{R_2 \left[\frac{1}{n\omega c}\right]^2}{R_2^2 + \left[\frac{1}{n\omega c}\right]^2}$$

$$X_n = n\omega L - \frac{R_2^2 \left[\frac{1}{n\omega c}\right]}{R_2^2 + \left[\frac{1}{n\omega c}\right]^2}$$

القيم الفعالة لموجات التيار غير الجيبية

The effective valuses of nonsinusoidal currents

تكون المعادلة العامة للقيمة الفعالة للتيار هى جذر متوسط المربعات *(root - mean - square)* كالآتى

$$I = \frac{1}{T}\sqrt{\int_0^T i^2\, dt}$$

وبقسمة أقصى تيار I_m على القيمة الفعالة للتيار I نحصل على عامل القيمة أى أن

$$K_A = \frac{I_m}{I} = Amplitude\ factor$$

اما للموجة الجيبية للتيار فيكون هذا العامل مساوياً $\sqrt{2}$ بينما لايساوى $\sqrt{2}$ للموجة غير الجيبية .

التوافقيات وجذر متوسط المربعات *Harmonics and r.m.s values*

من المعادلة رقم *[1]* تكون قيمة جذر متوسط المربعات فى حالة وجود التوافقيات

$$r.m.s\ value = \sqrt{a_0^2 + \frac{a_1^2}{2} + \frac{a_2^2}{2} \quad ....}$$

وتكون قيمة جذر متوسط مربعات الجهود V بأستخدام المعادلة رقم *[5]* هى

$$r.m.s\ value\ of\ voltage = \sqrt{V_0^2 + \frac{V_1^2}{2} + \frac{V_2^2}{2} + \ ....}$$

حيث $\frac{V_{1m}}{\sqrt{2}}$ قيمة جذر متوسط المربعات للمركبة الاساسية للجهد

$\frac{V_{2m}}{\sqrt{2}}$ قيمة جذر متوسط المربعات للتوافقية الثانية للجهد

وتكون قيمة جذر متوسط مربعات التيار i باستخدام المعادلة رقم *[6]*

$$r.m.s\ value\ of\ current = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \ ....}$$

التوافقيات والقيم المتوسطة *Harmonics and mean values*

وتكون القيمة المتوسطة للتيار كالآتى

$$I_{mean} = \frac{2}{\pi}\left[I_{1m} + \frac{I_{3m}\cos\Psi_3}{3} + \ .... + \frac{I_{nm}\cos\Psi_n}{n} \right]$$

ويوضح شكل (١٢-١) تمثيلاً للموجة الاساسية والتوافقية الثالثة والزاوية Ψ_3 بينهما.

القدرة الفعالة لموجة تيار غير جيبية

The active power of a nonsinusoidal current

تستخدم معادلة مماثلة لمعادلة القدرة الفعالة لموجة التيار الجيبية وهى :

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T vi\,dt$$

حيث v,i القيم الخطية للتيار والجهد

or
$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{n} V_n I_n \cos \Psi_n$$

التشوه بالتوافقيات *Harmonics distortion*

يعرف تشوه التوافقيات الكلى والذى يرمز له بالرموز *THD* **كالآتى**

The total harmonic distortion is defined as :

$$\frac{r.m.s \text{ value of all harmonics}}{r.m.s \text{ value of the fundamental}} \; X\,100$$

وبتحليل التيار *i* **تبعاً للمعادلة الآتية**

$$i = I_0 + I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} \sin 2\omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + \ldots\ldots\ldots$$

ويكون التيار الناتج من التوافقيات

$$= I_{2m} \sin 2\omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + \ldots\ldots\ldots\ldots$$

ويكون جذر متوسط المربعات *rms* **للتوافقيات يساوى**

$$= \sqrt{(1/2)\, I_{2m}^{\,2} + (1/2)\, I_{3m}^{\,2} + (1/2)\, I_{4m}^{\,2} + \ldots\ldots\ldots} \qquad [7]$$

حيث .... I_{2m}, I_{3m}, I_{4m} **اقصى قيمة لتيار التوافقيات**

$$r.m.s \text{ value of the fundamental} = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{(1/2)\, I_{1m}^{\,2}} \qquad (8)$$

وبقسمة المعادلة *(7)* **على المعادلة** *(8)* **نحصل على التشوه الكلى للتوافقيات فى موجة التيار والذى يساوى**

$$THD\,(i) = \sqrt{\left[\left(\frac{I_{2m}}{I_{1m}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{I_{1m}}\right)^2 + \left(\frac{I_{4m}}{I_{1m}}\right)^2 + \ldots\right]} \; X100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^{\,2}}}{i_1} \; X100\%$$

ولحساب جهد التوافقيات نفرض ان معاوقة دائرة التوليف *(tuned circuit)* **عند اى تردد هى**

$$Z = \frac{L/C}{R + j\,[\omega L - 1/\omega C]}$$

ويحدث توليف للدائرة عند التردد الاساسى وتكون معاوقتها عند الرنين هى

$$Z_r = \frac{L}{CR}$$

اى عندما $\omega L = \frac{1}{\omega\, C}$

ويكون أقصى جهد حادث على الدائرة عند حالة الرنين هو

$$V_{1m} = I_{1m}\; Z_r$$

ويرمز للتردد الزاوى الاساسى Fundamental angular frequency بـ ω_o ويكون تردد التوافقيات $n\omega_o$ حيث $n = 2,3,4,....$ ويمكن أهمال مقاومة دائرة التوليف فى حالة تردد التوافقيات بالمقارنة بمحاثة الدائرة ولذلك فان معاوقة التوافقيات تساوى :

$$Z_n \cong \frac{L/C}{j\,(n\omega_o L - \frac{1}{n\omega_o C})}$$

عندما

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

$$Z_n = \frac{L/C}{j\,\omega_o L\;\;(n - \frac{1}{n})}$$

وبقسمة كل من البسط والمقام على R نحصل على

$$Z_n = \frac{L/CR}{j\,(\omega_o \frac{L}{R})\;\;(n - \frac{1}{n})} = \frac{Z_r}{j\,Q\,(n - \frac{1}{n})}$$

Where

$$Z_r = \frac{L}{CR}$$

$$Q = \omega_0 \ \frac{L}{R}$$

$$\frac{Z_n}{Z_r} = \frac{n}{jQ\,(n^2 - 1)}$$

ويكون أقصى جهد خلال دائرة التوليف لمركبات التوافقيات n .

$$V_{nm} = I_{nm} Z_n$$

وعلى ذلك فإن التشوه الكلى لتوافقيات الجهد يساوى

$$THD\,(v) = \sqrt{\left[\left(\frac{v_{2m}}{v_{1m}}\right)^2 + \left(\frac{v_{3m}}{v_{1m}}\right)^2 + \left(\frac{v_{4m}}{v_{1m}}\right)^2 + ..\right]} X100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} v_n^2}}{v_1} X100\%$$

تأثير ملف المحاثة على شكل منحنى التيار

The effect of inductance coil on shape of the current curve

لو اعتبرنا تمثيلاً لمصدر تغذية كما فى شكل (١٣-١) أ والحمل عبارة عن ملف محاثة وتكون القيمة الفعالة للجهد المسلط على الملف هى :

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_3^2 + v_5^2 + ...v_n^2}$$

وعادة تكون منحنيات الجهد المتردد متماثلة بالنسبة للزمن لذلك لاتظهر التوافقيات الزوجية .

وتكون القيمة الفعالة لكل توافقية تيار كالآتى :

$$I_n = \frac{V_n}{n\omega L}$$

وتكون القيمة الفعالة للتيار المار بالملف :

$$I = \sqrt{\left[\left(\frac{V_1}{\omega L}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{3\omega L}\right)^2 + \left(\frac{V_5}{5\omega L}\right)^2 + \ldots\ldots\ldots\ldots\right]}$$

or

$$I = \frac{1}{\omega L} \sqrt{V_1^2 + \frac{V_3^2}{9} + \frac{V_5^2}{25}}$$

ويوضح شكل (١٣-١) ب منحنى الجهد v والتيار i بالملف L ويلاحظ ان منحنى التيار اقل تشوهاً من منحنى الجهد وذلك نتيجة لان تأثير التوافقيات يتناقص مع زيادة درجة التوافقية برغم احتواء معادلة التيار I على نفس عدد التوافقيات فى معادلة الجهد V

تأثير المكثف على شكل منحنى التيار

The effect of capacitor on shape of the current curve

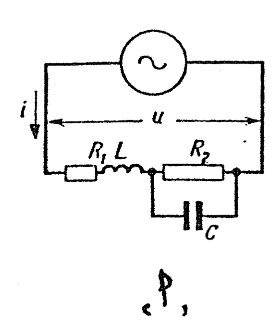
يوضح شكل (١٤-١) أ تمثيل مكثف مع مصدر التغذية ، وتكون القيمة الفعالة لتيار التوافقية كالآتى :

$$I_n = V_n \; n\omega C$$

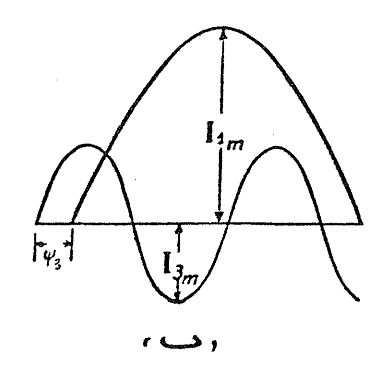
ويتعين التيار المار بالمكثف من المعادلة :

$$I = \omega c \sqrt{V_1^2 + 9\,V_3^2 + 25\,V_5^2 + \ldots\ldots}$$

ويوضح شكل (١٤-١) ب موجه التيار i وموجه الجهد v للمكثف ، ويلاحظ تشوه اكبر لموجة التيار نتيجة ان المحاثة السعوية *(Capacitive reactance)* تقل كلما زادت درجة التوافقية .

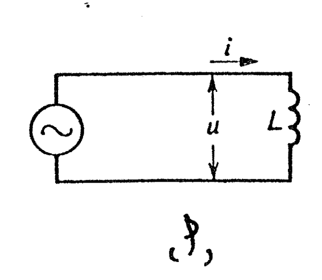


(أ)

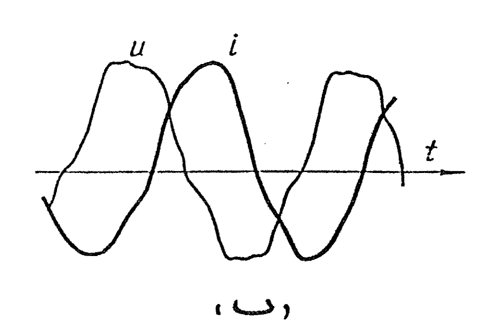


(ب)

شكل (١٢-١)

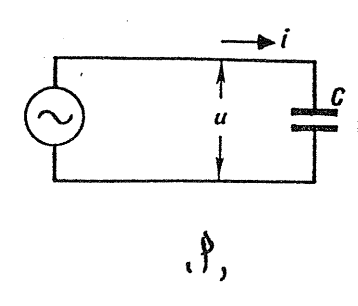


(أ)

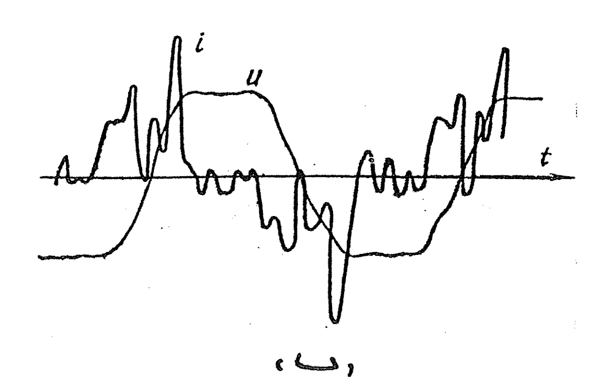


(ب)

شكل (١٣-١)



(أ)



(ب)

شكل (١٤-١)

جدول(١-١)

أمثلة لمصادر التوافقيات بالشبكات الكهربائية :

الاجهزة المسببة للتوافقيات	درجات التوافقيات	حدود تردد التوافقيات دورة / ثانية
أ - الآلات الدوارة *Rotating machines*		
١ - عضو التبديل والفرش *Commutator and brushes*	القطع / زوج أقطاب *(segments/pole pair)*	٥٠٠ - ٣٠٠
٢ - الاسنان والمجاري *Teeth and Slots*	المجارى/زوج أقطاب ±١	٢٥٠ - ٣٠٠٠
٣ - منحنى المجال المشوه *Distorted field curve*	٣ ، ٥ ، ٧ ...	١٥٠ - ١٠٠٠
٤ - عدم تماثل الملفات *Dissymmetry of the winding*	جزء من المركبة الاساسية	٥ - ٣٠
ب - المبدلات والموحدات *Rectifiers and Converters*		
١ - دائرة التيار المستمر *D.C circuit*	٢ ، ٤ ، ٦ ،	١٠٠ - ١٠٠٠
٢ - دائرة التيار المتردد *A.C circuit*	٣ ، ٥ ، ٧ ، ...	١٥٠ - ١٠٠٠
جـ - الدوائر غير الخطية *Circuit of nonlinear characteristic*		
١ - التخلفية والتشبع المغناطيسى *Magnetic saturation and hysteresis*	٣ ، ٥ ، ٧	١٥٠ - ١٠٠٠
٢ - الاقواس والشرارات *Arcs and sparks*	٣ ، ٥ ، ٧ ، ...	١٥٠ - ٥٠٠٠
٣ - تفريغ شحنة الهاله *Corona discharge*	٣ ، ٥ ، ٧	١٥٠ - ١٠٠٠
٤ - اشباه الموصلات *Semiconductors*	٣ ، ٥ ، ٧ ، ...	١٥٠ - ١٠٠٠

أمثلة على
التوافقيات فى الدوائر أحادية الوجه
Harmonics In Single Phase Circuit

مثال ١ :

سلط جهد على طرفى مكثف سعته $20\mu F$ ويخضع للمعادلة الآتية

$$e = 150 \sin 314\, t + 50 \sin 942\, t$$

احسب

- القيمة اللحظية لتيار الشحن *Instantaneous value of the charging current*
- قيمة جذر متوسط المربعات لتيار الشحن

The r.m.s value of the charging current

الحل :

يلاحظ من معادلة الجهد انها عبارة عن مركبة اساسية ترددها $f = 50\ Hz$ والمركبة الاخرى مركبة التوافقية الثالثة وترددها $f_3 = 150\ Hz$ اى ان :

$$e = 150 \sin (2\pi \times 50)t + 50 \sin (2\pi \times 150)t$$

$$= E_{1m} \sin (2\pi f)\, t + E_{3m} \sin (2\pi f_3)t$$

$$= E_{1m} \sin(\omega t) + E_{3m} \sin (3\omega t)$$

ولحساب أقصى قيمة لتيار المركبة الاساسية فان

$$\omega = 2\,\pi f = 2\,\pi \times 50$$

$$X_{c1} = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{2\pi \times 50 \times 20} = 159\ \Omega$$

$$I_{1m} = \frac{E_{1m}}{X_{C1}} = \frac{150}{159} = 0.943\ A$$

ولحساب أقصى قيمة لتيار مركبة التوافقية الثالثة فان :

$$\omega_3 = 3\omega = 2\ \pi f_3 = 2\pi\ X\ 150$$

$$X_{C3} = \frac{1}{3\ \omega C} = \frac{10^6}{2\pi\ X\ 150\ X\ 20} = 53\ \Omega$$

$$I_{3m} = \frac{E_{3m}}{X_{C3}} = \frac{50}{53} = 0.943\ A$$

وحيث أن التيار بالمكثف يتقدم على الجهد بزاوية $\pi/2$ فان القيمة اللحظية لتيار الشحن تكون

$$i = 0.943\ \sin(314\ t + \pi/2) + 0.943\ \sin(942\ t + \pi/2)$$

وتكون قيمة جذر متوسط المربعات لتيار الشحن كالآتى

$$r.m.s\ value = \sqrt{\left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2} = 0.943\ A$$

مثال ٢ :

دائرة مكونة من مقاومة وملف . سلط عليها جهداً يخضع للمعادلة

$$e = 230\ \sin 314\ t + 50\ \sin(942t + \pi/3) + 20\ \sin(1570\ t + 5\ \pi/6)$$

احسب

- التيار والقدرة الكلية ومعامل القدرة

$L = 0.05\ H$ ، $R = 20\ \Omega$

الحل :

تنقسم معادلة الجهد الى مركبة اساسية ومركبتى التوافقية الثالثة والخامسة كالآتى

$$e = E_{1m}\ \sin(2\pi f)t + E_{3m}\ \sin\{2\pi\ x\ 3f)t + \pi/3\} + E_{5m}\ \sin\{(2\pi\ x5f)t + 5\pi/6\}$$

وتحسب معاوقات المركبات كالآتى :

$$Z_1 = R + jx_1 = R + j\omega L$$

$$= 20 + j\,(314 \times 0.05)$$

$$= 20 + j\,15.7 = 25.4 \angle 38.1^o\ \Omega$$

$$Z_3 = R + j\,x_3$$

$$= 20 + j\,3\omega L$$

$$= 20 + j\,47.1 = 55.5 \angle 67^o\ \Omega$$

$$Z_5 = R + j\,x_5$$

$$= 20 + j\,5\,\omega L$$

$$= 20 + j\,78.5 = 81 \angle 75.7^o\ \Omega$$

وباستخدام هذه المعاوقات ومعادلة الجهد نحصل على معادلة التيار الآتية

$$i = \frac{230}{25.4}\sin(314\,t - 38.1^o) + \frac{50}{25.5}\sin(942\,t + 60^o - 67^o) + \frac{20}{81}\sin(1570t + 150^o - 75.7^o)$$

$$= 9.06 \sin(314t - 38.1^o) + 0.9 \sin(942t - 7^o) + 0.25 \sin(1570 + 74.3^o)$$

وتكون قيمة r.m.s للتيار كالآتى :

$$r.m.s\ current = \sqrt{\left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$= 6.44\ A$$

القدرة الكلية $= I^2R = 829\ watt$

وقيمة $r.m.s$ للجهد كالآتى

$$r.m.s\ voltage = \sqrt{\left(\frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$= 167\ Volt$$

$$\text{معامل القدرة} = \frac{Watts}{VA} = \frac{829}{167 \times 6.44} = 0.771$$

مثال ٣ :

اوجـد جذر متوسط المربعات (rms) لموجة تيار مركبة باستخدام الطريقـة التخطيطيـة $(graphic\ method)$ اذا كانت قيم جذر متوسط مربعات مركبات التيار هى

$$I_1 = 100\ A\ ,\ I_2 = 50\ A\ ,\ I_3 = 50\ A\ ,\ I_5 = 25\ A$$

الحل :

يوضح شكل (١٥-١) أ الطريقة التخطيطية للحصول على جذر متوسط المربعات للتيار I والذى يساوى $125\ A$.

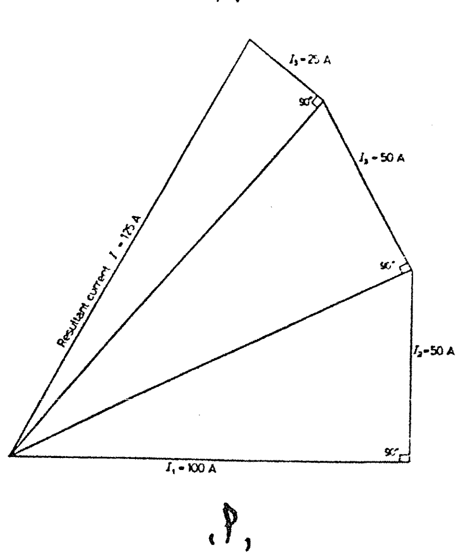
مثال ٤ :

اوجد جذر متوسط المربعات (rms) لموجة جهد مركبة باستخدام الطريقة التخطيطية اذا كانت قيم جذر متوسط مربعات مركبات الجهد هى

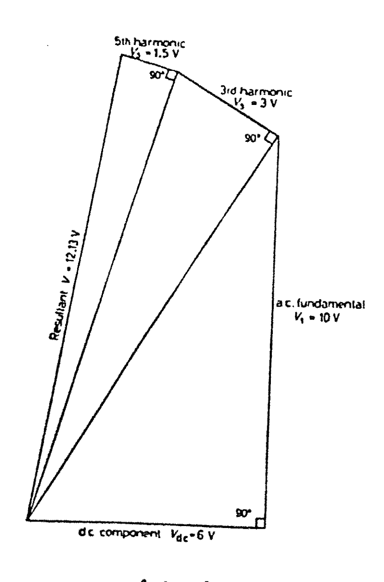
$$V_0 = 6V\ ,\ V_1 = 10V\ ,\ V_3 = 3V\ ,\ V_5 = 1.5V.$$

الحل :

يوضح شكل (١٥-١) ب الرسم الخطى للحصول على جذر متوسط المربعات للجهد V والذى يساوى $12.13V$.



(أ)



(ب)

شكل (١٥-١)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

أمثلة على
التوافقيات فى الدوائر ثلاثية الأوجه
Harmonics In 3-phase circuits

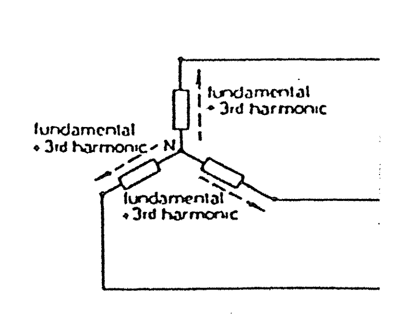
مثال ٥ :

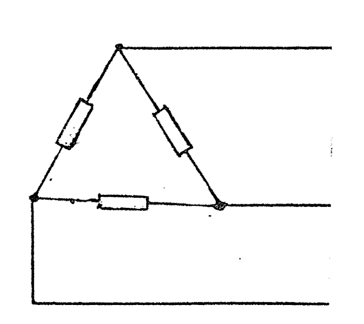
مولد ثلاثى الاوجه ، القوة الدافعه الكهربائية *emf* لكل وجة تساوى *230 V* وتحتوى على مركبة التوافقية الثالثة بنسبة *12 %* ومركبة التوافقية الخامسة بنسبة *8 %* .

احسب جهد الخط *(rms)* فى حالتى

- التوصيل نجمة *(Y)*
- التوصيل دلتا (Δ)

الحل





لو فرضنا أن V_1 هو *rms* لجهد الوجه فان :

مركبة التوافقية الثالثة $V_3 = 0.12\ V_1$

مركبة التوافقية الخامسة $V_5 = 0.08\ V_1$

$$\therefore\ 230 = V_1^2 + (0.12V_1)^2 + (0.08\ V_1)^2 = 1.0104\ V_1$$

$$V_1 = 227.6\ V$$

$$V_3 = 0.12 \times 227.6 = 27.31\ V$$

$$V_5 = 0.08 \times 227.6 = 18.21\ V$$

فى حالة التوصيل نجمة

$=\sqrt{3}\ X 227.6 = 394.2\ V$ قيمة (rms) لجهد الخط (المركبة الاساسية)

$0 =$ قيمة (rms) المركبة التوافقية الثالثة لجهد الخط

$=\sqrt{3}\ X 18.21 = 31.54\ V$ قيمة (rms) لمركبة التوافقية الخامسة لجهد الخط .

$=\sqrt{(394.2)^2 + (31.54)^2} = 395.46\ V$ قيمة (rms) لجهد الخط .

فى حالة التوصيل دلتا :

لاتوجد أيضاً مركبة التوافقية الثالثة فى جهد الخط

$=\sqrt{227.6^2 + 18.21^2}$ قيمة rms لجهد الخط

$= 228.33\ V$

مثال ٦ :

مولد ثلاثى الأوجه 50 Hz توصيل دلتا (Δ) - خصائص ملفات عضو الاستنتاج (armature winding) لكل وجه كالآتى $r = 0.025\ \Omega, L = 0.4\ mH$ تحتوى موجة القوة الدافعة الكهربائية (emf) فى حالة اللاحمل على مركبات التوافقيات الثالثة والتاسعة والخامسة عشر كنسبة من الموجة الاساسية والتى تساوى 4% , 2% , 1.5% على التوالى - قيمة القوة الدافعة الكهربائية تساوى 850 V احسب التيار الدائرى (Circuilating current) فى حالة اللاحمل .

الحل :

نحسب أولاً قيمة الممانعة (reactance) لكل وجه عند التردد الاساسى وتردد التوافقيات

عند التردد الاساسى

$$X_1 = \omega L = 314\ X 0.4\ X 10^{-3} = 0.126\ \Omega$$

عند تردد التوافقية الثالثة

$$X_3 = 3\ \omega L = 3\ X 0.126 = 0.378\ \Omega$$

عند تردد التوافقية التاسعة

$$X_9 = 9\ \omega L = 9 \ X\ 0.126 = 1.134\ \ \Omega$$

عند تردد التوافقية الخامس عشر

$$X_{15} = 15\ \omega L = 15\ X\ 0.126 = 1.89\ \ \Omega$$

$$Z_3 = \sqrt{R^2 + X_3^{\ 2}} = \sqrt{0.025^2 + 0.378^2} = 0.378\ \Omega$$

$$Z_9 = \sqrt{R^2 + X_9^{\ 2}} = \sqrt{0.025^2 + 1.134^2} = 1.134\,\Omega$$

$$Z_{15} = \sqrt{R^2 + X_{15}^{\ 2}} = \sqrt{0.025^2 + 1.89^2} = 1.89\ \Omega$$

$$E_{3m} = 0.04\ x\,850 = 34\ V$$

$$E_{9m} = 0.02\ x\,850 = 17\ V$$

$$E_{15m} = 0.015\ x\,850 = 12.7\ V$$

ويكون التيار الدائرى فى حالة اللاحمل

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\frac{E_{3m}}{Z_3}\right)^2 + \left(\frac{E_{3m}}{Z_9}\right)^2 + \left(\frac{E_{3m}}{Z_{15}}\right)^2}$$

$$= 64.8\ A$$

مثال ٧ :

مولد ـ ثلاثى الأوجه – 2200 v , 750 kw , 50 Hz يحتوى جهد الوجه على مركبة التوافقية الثالثة بنسبة 5% .

احسب التيار الدائرى (circuilating current) عند الجهد المقنن اذا وصل المولد على شكل دلتا (Δ) قيمة المقاومة لكل وجه $0.25\ \Omega$ ،قيمة الممانعة لكل وجه $0.7\ \Omega$.

ثم احسب الفقد نتيجة التيار الدائرى كنسبة من الحمل الكلى .

الحل

فى حالة التوصيل دلتا ، فان القوة الدافعة الكهربائية للتوافقية الثالثة تسبب مرور التيار الدائرى داخل الدلتا .

مركبة التوافقية الثالثة للجهد / الوجه $= 0.05 \times 2200 = 110\ V$

ممانعة التوافقية الثالثة / الوجه $= 3 \times 0.7 = 2.1\ \Omega$

معاوقة التوافقية الثالثة / الوجه $= \sqrt{0.25^2 + 2.1^2} = 2.115\ \Omega$

التيار الدائرى نتيجة التوافقية الثالثة $= \dfrac{110}{2.115} = 52.01\ A$

مفقودات النحاس فى الثلاثة أوجه $= 3 I^2 R$

$$= 3 \times 52.01^2 \times 0.25 = 2028.8\ watt$$

نسبة الفقد بالنسبة للحمل الكلى $= \dfrac{2028.8}{750000} \times 100 = 0.27\ \%$

ملاحظات :

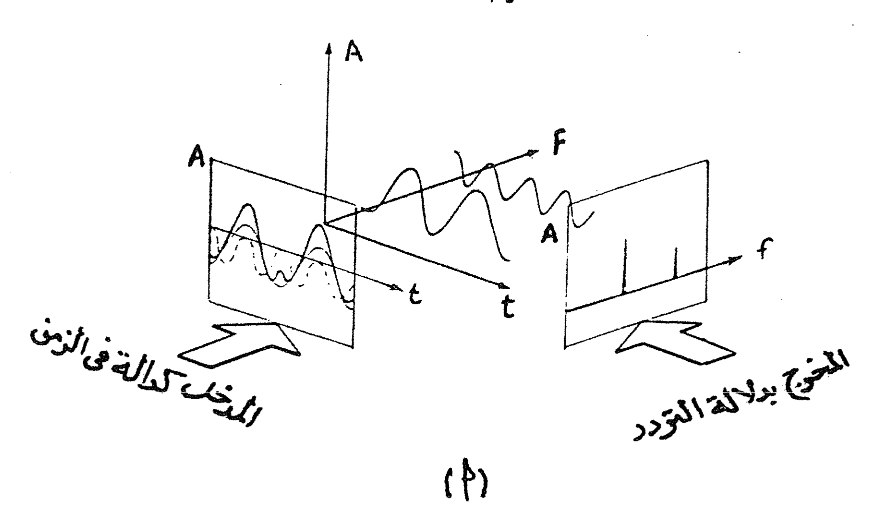
يلاحظ الآتى من الامثلة العددية السابقة :

- أن موجات المدخل عبارة عن دالة فى الزمن ـ وتحسب قيم مركبات التوافقيات تبعاً لدرجة التوافقية ، ويمثل ذلك كما فى شكل (١٦-١) أ حيث تمثل التوافقيات بقيم موازية للمحور الرأسى عند درجات التوافقيات الموجودة .
- تبعاً لدرجات التوافقيات الموجودة فى موجة المدخل المشوهه ، تسجل قيم هذه التوافقيات ودرجاتها كما فى الاشكال (١٦-١) ب ، جـ ، ء والتى تعرف بطريقة الطيف الترددى *(Frequency spectrum)* .

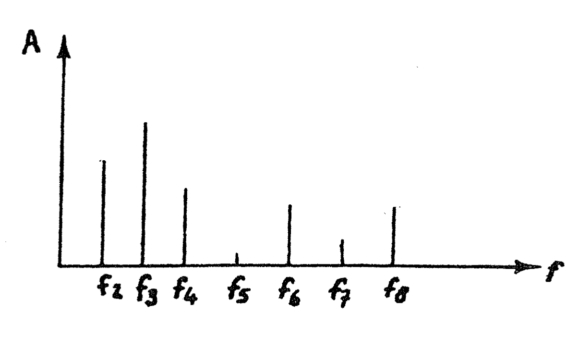
أمثلة عملية لموجات مشوهه تحتوى على توافقيات

١ - يكون الجهد الحادث *(induced voltage)* على المحرك التأثيرى اللاامتزامن *(asynchronous induction motor)* مشوهاً كما فى شكل (١٧-١) .

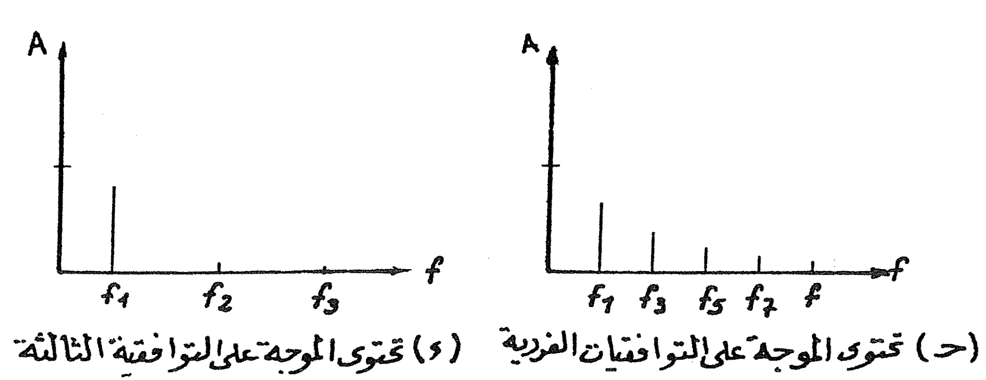
٢ - ويوضح شكل (١٨-١) موجتى الجهد والتيار لمحرك بمبدل أحادى الوجه للسكك الحديدية *(Single phase railway Commutator motor)* فى حالة الحمل الكامل .



(أ)



(ب) تحتوى الموجة على جميع التوافقيات



(د) تحتوى الموجة على التوافقية الثالثة

(حـ) تحتوى الموجة على التوافقيات الفردية

شكل (١٦-١)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

ويلاحظ احتواء الموجتين على توافقيات مسببة تشوه الموجات .

٣ - ويوضح شكل (١٩-١) منحنيات مولد تربيني *(Turbogenerator)* ذو عدد كبير من المجارى بالعضو الدوار *(Densely slotted motor)* . وتحتوى منحنيات الفيض (Φ) ، وجهد الوجه ($\acute{e}$) والجهد بين كل وجهين لملفات العضو الثابت (e) على توافقيات ذات ترددات عالية .

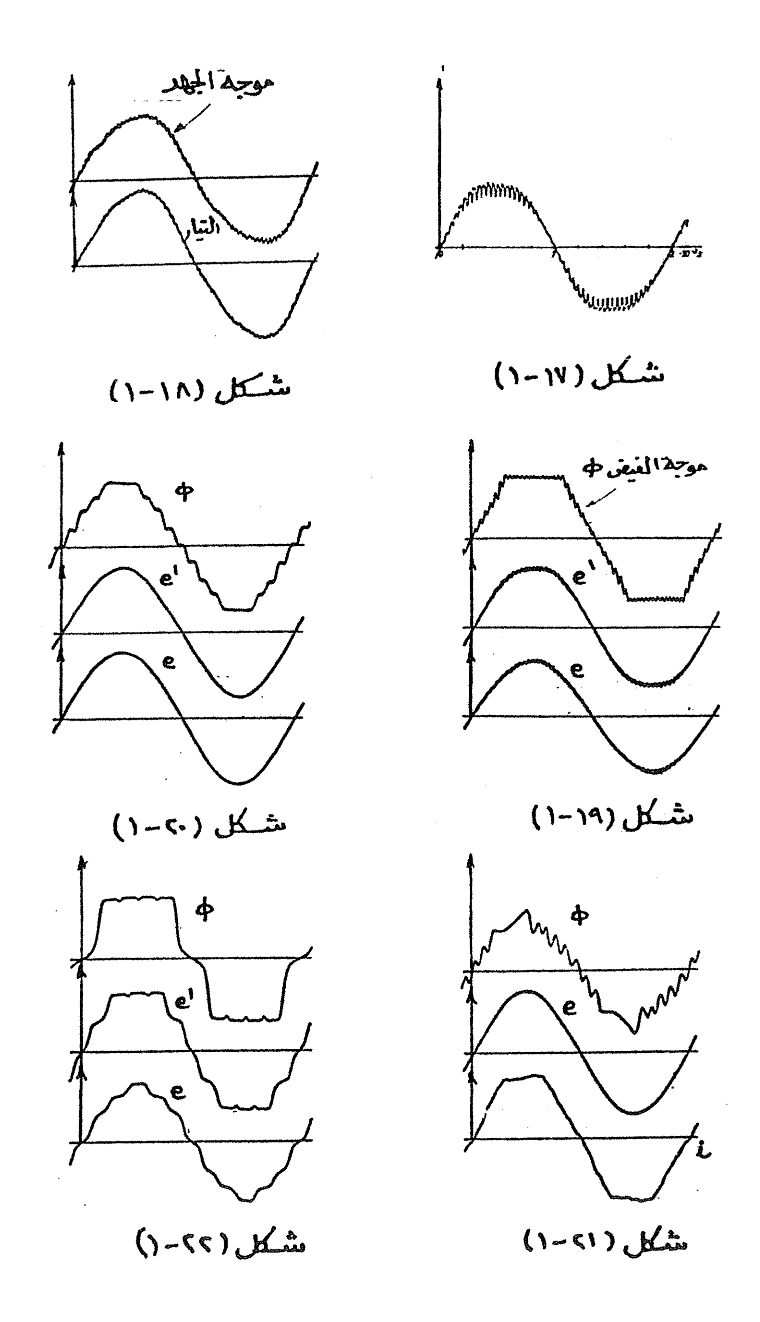
٤ - بينما نحصل على المنحنيات الموضحة بشكل (٢٠-١) لمولد تربيني بمجارى خشنة *(coarsely slotted turbogenerator)* عند حالة اللاحمل ، ويدعم هذا المولد بملفات بالعضو الثابت *(Favorable stator winding)* تعمل على حفظ موجة الجهد جيبية على أطراف العضو الثابت (e) ،حتى فى حالة وجود تيارات (i) ذات موجة مشوهه كما فى شكل (٢١-١) ، وتكون موجة الجهد بين الاوجه لملفات العضو الثابت (e) وموجة الوجه ($\acute{e}$) مشوهتين ، اذا كانت ملفات العضو الثابت غير مدعمة *(unfavorable)* وهذا واضح فى شكل (٢٢-١) ويوضح شكل (٢٣-١) اذا كانت ملفات العضو الثابت اكثر تدعيماً .

٥ - باستخدام مولد ذى أقطاب بارزة *(salient - pole generator)* نحصل على المنحنيات الموضحة بشكل (٢٤-١) والتى تكون أكثر نقاءاً ولاتحتوى على تشوهات .

عموماً يلاحظ أنه يجب مراعاة العناية الفائقة عند تصميم المولدات حتى لاتحتوى موجات جهد المخرج على توافقيات ، وكذلك مراعاة نفس الشئ فى المحركات والتى تؤثر بدرجة كبيرة على الشبكة الكهربائية ويوضح شكل (٢٥-١) تشوه فى شكل موجتى الجهد (e) والتيار (i) لشبكة كهرباء صناعية اما شكلى (٢٦-١) ، (٢٧-١) فيمثلان اشكال لموجتى الجهد والتيار لشبكتين مختلفتين بنظام ثلاثى الاوجه .

وتختلف درجات التوافقيات بكل منهما اعتماداً على طبيعة الاحمال .

٦ - لو اعتبرنا مثالاً لاحمال مبنى سكنى مغذى من محول توزيع بجهد ٢٢٠ ڤولت وتم اخذ القياسات لمدة سبعة ايام (شكل (٢٨-١) نلاحظ ان العلاقة بين القدرة الفعالة *(active power)* والزمن بشكل (٢٨-١)أ علاقة دورية ويعتبر المصدر الاكبر للقدرة الفعالة من السخانات وبعض أنواع الاضاءة ، كما يوضح شكل (٢٨-١) ب العلاقة بين القدرة غير الفعالة *(reactive power)* والزمن ويلاحظ انها علاقة متغيره عشوائية ذات تغيرات سريعة ، والمصدر الاكبر لهذه القدرة من الثلاجات واللمبات الفلورسنت ومحركات المصاعد .



شكل (١٧-١)

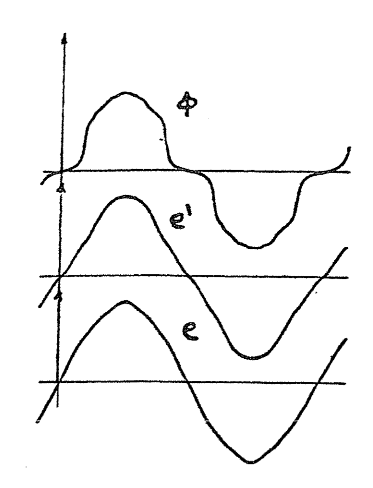
شكل (١٨-١)

شكل (١٩-١)

شكل (٢٠-١)

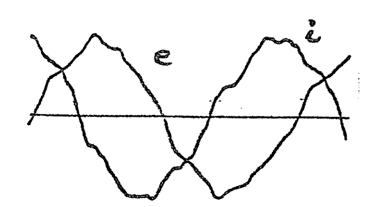
شكل (٢١-١)

شكل (٢٢-١)

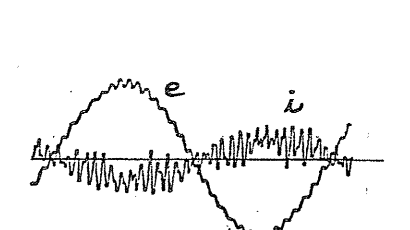


شكل (٢٣-١)

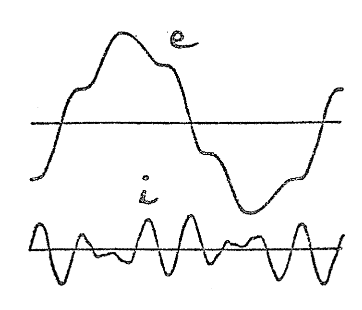
شكل (٢٤-١)



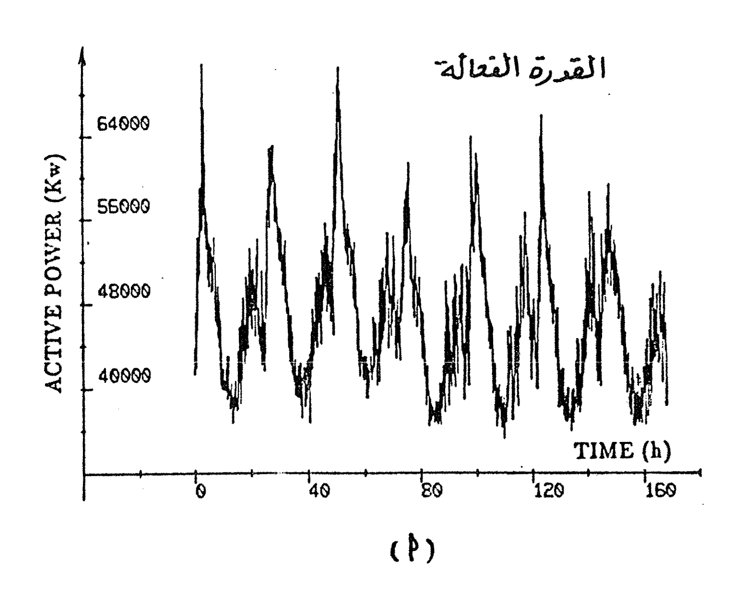
شكل (٢٥-١)



شكل (٢٦-١)

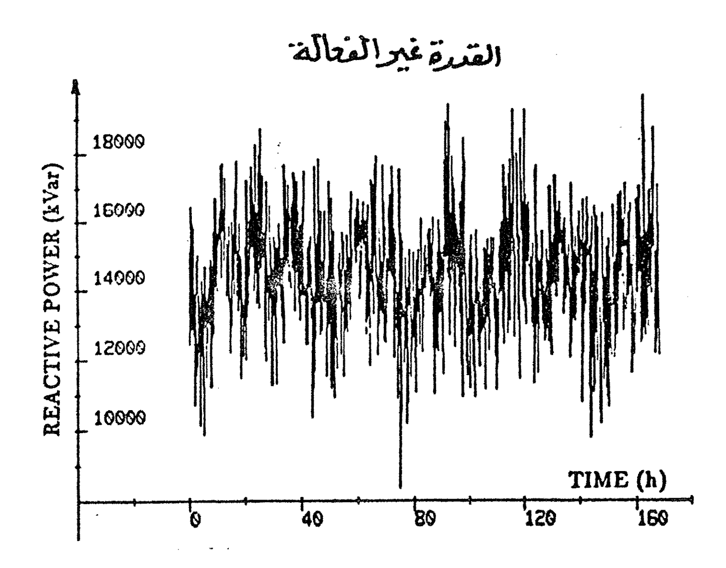


شكل (٢٧-١)



القدرة الفعالة
ACTIVE POWER (Kw)
64000
56000
48000
40000
TIME (h)
0
40
80
120
160

(أ)



القدرة غير الفعالة
REACTIVE POWER (kVar)
18000
16000
14000
12000
10000
TIME (h)
0
40
80
120
160

(ب)

شكل (٢-٨-١)

التوافقيات بالتيار المستمر D.C Harmonics

تستخدم الموحدات *(Rectifiers)* والمبدلات *(Convertors)* لتحويل التيار المتـردد *(a.c)* الى تيار مستمر *(d.c)* وتصنف المعدات الى مايأتى :

- معدات استاتيكية (اشباه الموصلات *Semiconductor*) مثل موحدات السلنيوم *(Selenium)* والسيليكون *(Silicon)* .
- موحدات القوس الزئبقى *Mercury - arc rectifiers*

أو موحدات البخار الزئبقى *Mercury vapour rectifiers*

- مبدلات دوارة *Rotary converters*
- مجموعة محرك / مولد *Motoe - generator set*

ويحتوى مخرج التيار المستمر *(d.c)* على توافقيات ، ويخضع المخرج لتحليل فورير كالآتى .

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1} A_n \cos n\omega t + \sum_{n=1} B_n \sin n\omega t$$

ويوضح شكل (٢٩-١) موجه التيار المستمر *f(t)* المحتوية على المركبة الاساسية A_0 ، والتوافقيات .

ويوضح شكل (٣٠-١) جهد مخرج مولد تيار مستمر *(d.c generator)* عند حالة اللاحمل *(no load)* ويعطى شكل (٣١-١) منحنى الجهد لمبدل دوار متزامن *(synchronous converter)* عند حالة الاحمال العادية ويلاحظ احتوائه على عدد كبير جداً من التموجات *(ripples)* مركبة على المركبة الاساسية .

وتحدث موحدات القوس الزئبقى توافقيات عالية ، وخاصة اذا استخدمت لعدد قليل من الاوجه . حيث تعمل الموحدات بتيارات مشطورة *(chopped currents)* على اطراف الانود *(Anodes)* ، وهذا يؤدى الى عدم استمرارية التأثير على جانبى الموحدات ، ليس فقط على جانب التيار المستمر ولكن ايضاً على جانب الجهد المتردد لشبكة التغذية ثلاثية الاوجه ، شكل (٣٢-١) ، بينما يوضح شكل (٣٣-١) جهد المخرج لموحد ثلاثى الاوجه باستخدام ٦ أنود *(6-Anode 3-phase rectifier)* ويلاحظ احتواء موجه الجهد على

عدد كبير من التموجات تكون عبارة عن مركبة التوافقية السادسة ومضاعفتها ، بينما يوضح شكل (٣٤-١) موجتى التيار والجهد جهة الشبكة (أى جهة *a.c* للموحد) ، ويلاحظ شكل موجة التيار والتى بتحليلها يتضح احتواءها على التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر والثالثة عشر .

طرق أخرى لتسجيل التوافقيات

١ - دالة الاحتمال التجمعية *Cumulative probability Function*

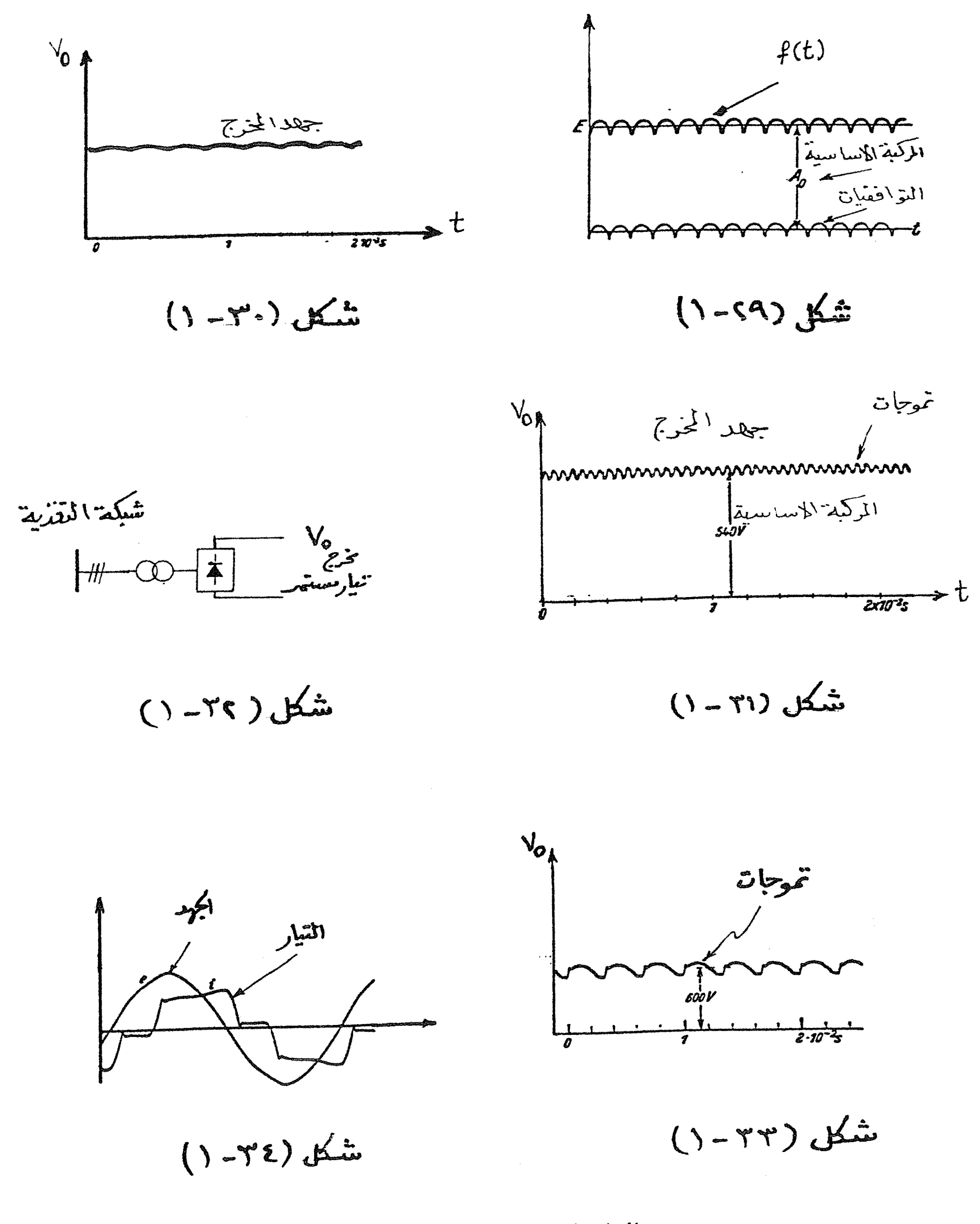
عندما لانرغب فى استخدام الزمن كدالة لتسجيل التوافقيات فيمكن ان نستخدم دالة الاحتمال التجمعية وذلك بتسجيل العلاقة بين النسبة المئوية لزمن كلى محدد وبين النسبة بين تيار درجة توافقية معينة وحدود تيار هذه التوافقية { اى النسبة I_n / I_{limit} وتعرف هذه النسبة بتيار التسوية *(normalized current)* } ثم يتم تحويل هذا المنحنى الى منحنى الاحتمال بحيث يتحول محور النسبة المئوية للزمن الكلى الى محور الاحتمال *(Probability)* وعندئذ يعرف هذا المنحنى بمنحنى الاحتمال . ويوضح شكل (٣٥-١) أ مثال لدالة الاحتمال التجمعية لتيار التوافقية الخامسة مقاسة لشبكة كهربائية جهد ٢٢٠ ك. ف بينما يوضح شكل (٣٥-١) ب منحنى الاحتمال للشكل الموضح بشكل (٣٥-١) أ وبذلك تصبح الدالة معبرة عن احتمالات ان قيمة التوافقية تتعدى مستوى محدد.

٢ - الرسم البيانى النسيجى *Histogram*

وهو يعنى رياضياً رسم بيانى مؤلف من سلسلة من المستطيلات ويستخدم لاعطاء دلالة لتغيير قيم توافقية معينة ، كما فى شكل (٣٦-١) والذى يوضح تيار التوافقية الخامسة والذى له قيمة محددة ٣,٤ أمبير عند جهد ٢٢٠ ك.ف وبأخذ القياسات فى زمن محدد مع تقسيم هذه القياسات الى عدد من العينات *(samples)* وتحديد قيمة تيار التوافقية الخامسة بكل عينة ثم تسجيلها كما فى الشكل . وأحياناً يعرف محور الاحداثيات الرأسى بكثافة الاحتمال *(Probability density)* .

وفيما يلى توضيح لمعنى هذه المصطلحات

- بفرض أن $f(x)$ دالة مستمرة *(Continous function)* فى المتغير (x) فان معادلة توزيع الاحتمالية *(probability distribution)* للمتغير الاحصائى (x) هى :



شكل (٢٩-١)

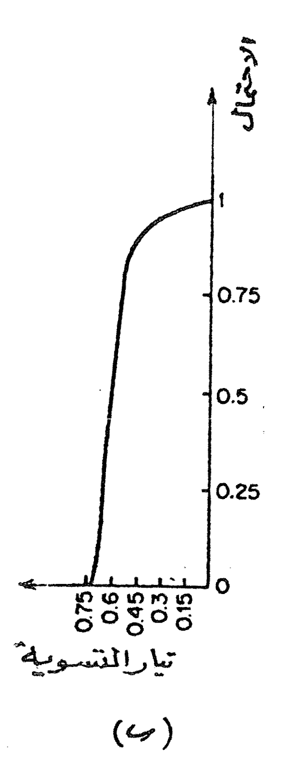
شكل (٣٠-١)

شكل (٣١-١)

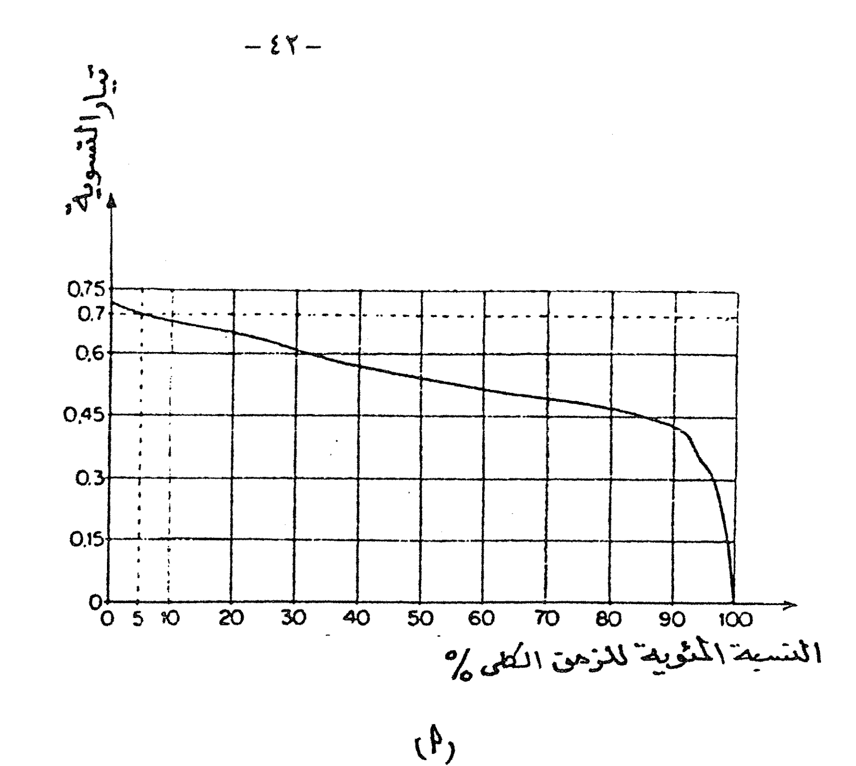
شكل (٣٢-١)

شكل (٣٣-١)

شكل (٣٤-١)

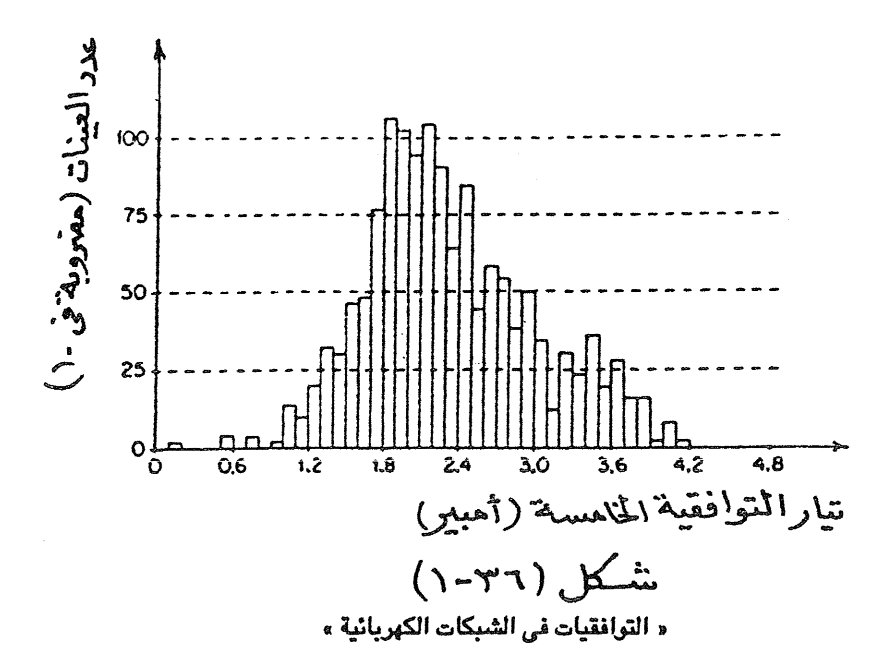


(ب)



(أ)

شكل (٣٥-١)



شكل (٣٦-١)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

$$f(x)\,dx = P(x - \frac{1}{2}dx \leq x \leq x + \frac{1}{2}dx)$$

حيث :

$f(x)$: دالة كثافة الاحتمال *probability density function*

او دالة الكثافة *Density function*

$f(x)\,dx$: تفاضل الاحتمال *probability differential*

وتحقق المعادلة احتمال وقوع x فى الفترة من $x - \frac{1}{2}\,dx$ إلى $x + \frac{1}{2}\,dx$ ويعرف المنحنى المستمر $y = f(x)$ بأنه منحنى كثافة الاحتمال او منحنى الاحتمال للتبسيط ، واذا كان المنحنى متماثلاً *(Symmetrical)* فان التوزيع يكون متماثلاً .

اذا كانت x لها قيم فى الفترة (a,b) فقط وكانت دالة الكثافة $\Phi(x)$ ، فان توزيعها يخضع للعلاقات الآتية

$$f(x) = 0 \qquad x < a$$

$$= \Phi(x) \qquad a \leq x \leq b$$

$$= 0 \qquad x > b$$

وتكون خصائص الدالة $f(x)$ كالآتى

١ - ان $f(x) \geq 0$ لجميع قيم x ، اى لايوجد اى معنى للاشارة السالبة للاحتمال .

٢ - ان $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\,dx = 1$ ، ويعنى هذا ان المساحة تحت المنحنى تساوى الوحدة .

ويكون احتمال وقوع المتغير x فى الفترة (c,d) كالآتى

$$f(x) = P\,(c \leq x \leq d) = \int_{c}^{d} f(x)\,dx$$

ويعنى هذا ان المساحة محددة من $x = c$ الى $x=d$

ويعرف $f(x)$ بدالة التوزيع التجمعية *comulative distribution function* للمتغيــر x وأحياناً يعرف بدالة التوزيع *distribution function*

مثال ٨ :

دالة تخضع للمعادلات الآتية

$$f(x) = 0 \qquad x < 2$$
$$= (1/18)(3+2x) \qquad 2 \le x \le 4 \qquad (1)$$
$$= 0 \qquad x > 4$$

أ – هلى هى دالة كثافة الاحتمال ؟

ب – اوجد احتمال وقوع المتغير فى الفترة $2 \le x \le 3$

الحل:

أ – لاثبات ان الدالة هى دالة كثافة الاحتمال فيجب تحقيق

$$f(x) \ge 0 \quad , \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, dx = 1$$

اولاً : واضح من المعادلات رقم 1 ان $f(x) \ge 0$ لجميع قيم x للفترة المعطاة .

ثانياً :

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, dx = \int_{-\infty}^{2} 0.dx + \int_{2}^{4} (1/18)(3+2x)dx + \int_{4}^{\infty} 0.dx = 1$$

ب – ولحساب الاحتمال المطلوب

$$P\ (2 \le x \le 3) = \int_{2}^{3} (1/18)\ (3+2x)\ dx = 4/9$$

ولتطبيق ذلك على التوافقيات نستعرض المثال التالى :

يوضح شكل (٣٧-١) تسجيل للقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة لاحمال سوبر ماركت فى فترة زمنية ١٦٠ ساعة ، وتم تحليل التوافقيات الموجودة فى الاحمال ووجد احتوائها على التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة بالاضافة الى المركبة الاساسية للتيار .

ويوضح شكل (٣٨-١) أ المركبة الاساسية للتيار كمتغير مع الزمن وتم تحويلها الى الرسم البيانى النسيجى للمركبة الاساسية للتيار كمتغير مع كثافة الاحتمال وذلك بتحديد حدود معينة لقيمة تيار المركبة الاساسية . فمثلاً بفرض ان دالة المركبة الاساسية للتيار الموضحة بشكل (٣٨-١) أ هى $\Phi(I)$ ويراد معرفة كثافة الاحتمال لوقوع المتغير I فى الحدود $200 \le I < 210$ وبمعرفة معادلة $\Phi(I)$ وباستخدام المعادلات رقم 1 يتم حساب

$$P\,(200 \leq I \leq 210) = \int_{200}^{210} \Phi(I)\, dI$$

ويوضح شكل (٣٨-١) ب ان هذه القيمة تساوى *0.0015* ... وهكذا لرسم باقى الرسم البيانى النسيجى .

بنفس الطريقة امكن رسم منحنيات التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة للتيار كما فى شكل (٣٩-١) .

تعريفات :

١ - نقطة الربـــط المشترك *Point of common coupling* ويرمــز لهـــا بالرمـــوز *(PCC)*

تعرف نقطة الربط المشترك (مع مشتركين آخرين) بأنها نقطة الربط فى شبكة تغذية عامة ، وتكون قريبة من مصدر التغذية ويتأثر المشتركين بأية اضطرابات ناتجة من مشترك آخر متصل معهم على نقطة الربط .

يمكن ان تقع نقطة الربط المشترك فى أى مكان على شبكة التغذية ولكن عادة تكون هى نقطة الوصل بين المعاوقتين Z_B , Z_A فى شكل (٤٠-١) .

حيث :

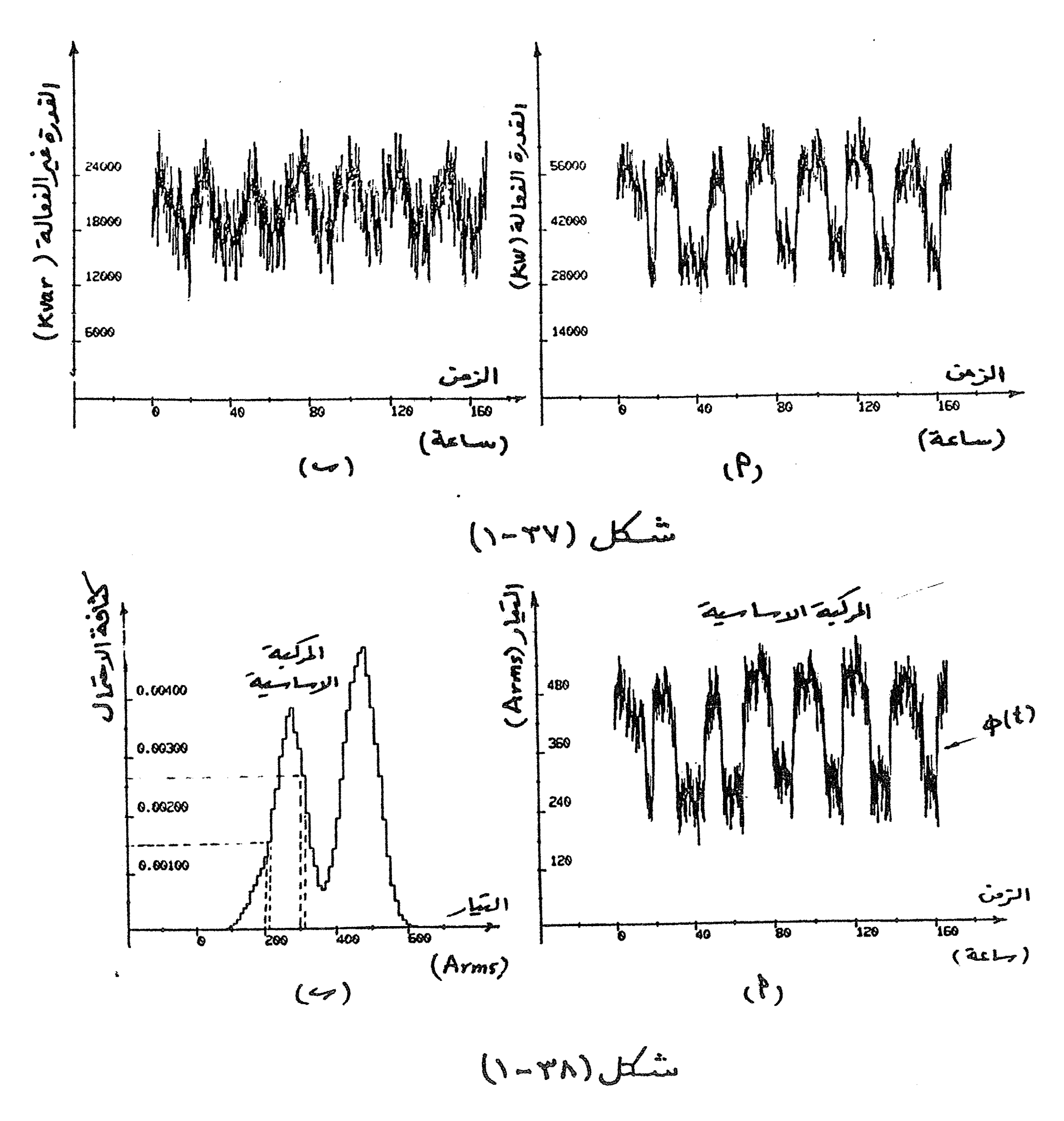
Z_A: معاوقة المصدر او النظام *(System Impedance)* وهى المعاوقة من المصدر وحتى النقطة *PCC* المتصلة بمستهلكين آخرين

Z_B: معاوقة خدمة التوصيل *(Service connection Impedance)* . وهى معاوقة خدمة التوصيل من النقطة *PCC* (المتصلة مع مستهلكين آخرين) وحتى مكان تركيب العدادات عند المستهلكين .

٢ - معاوقة التوصيلات المنزلية *House wiring Impedance* (Z_C)

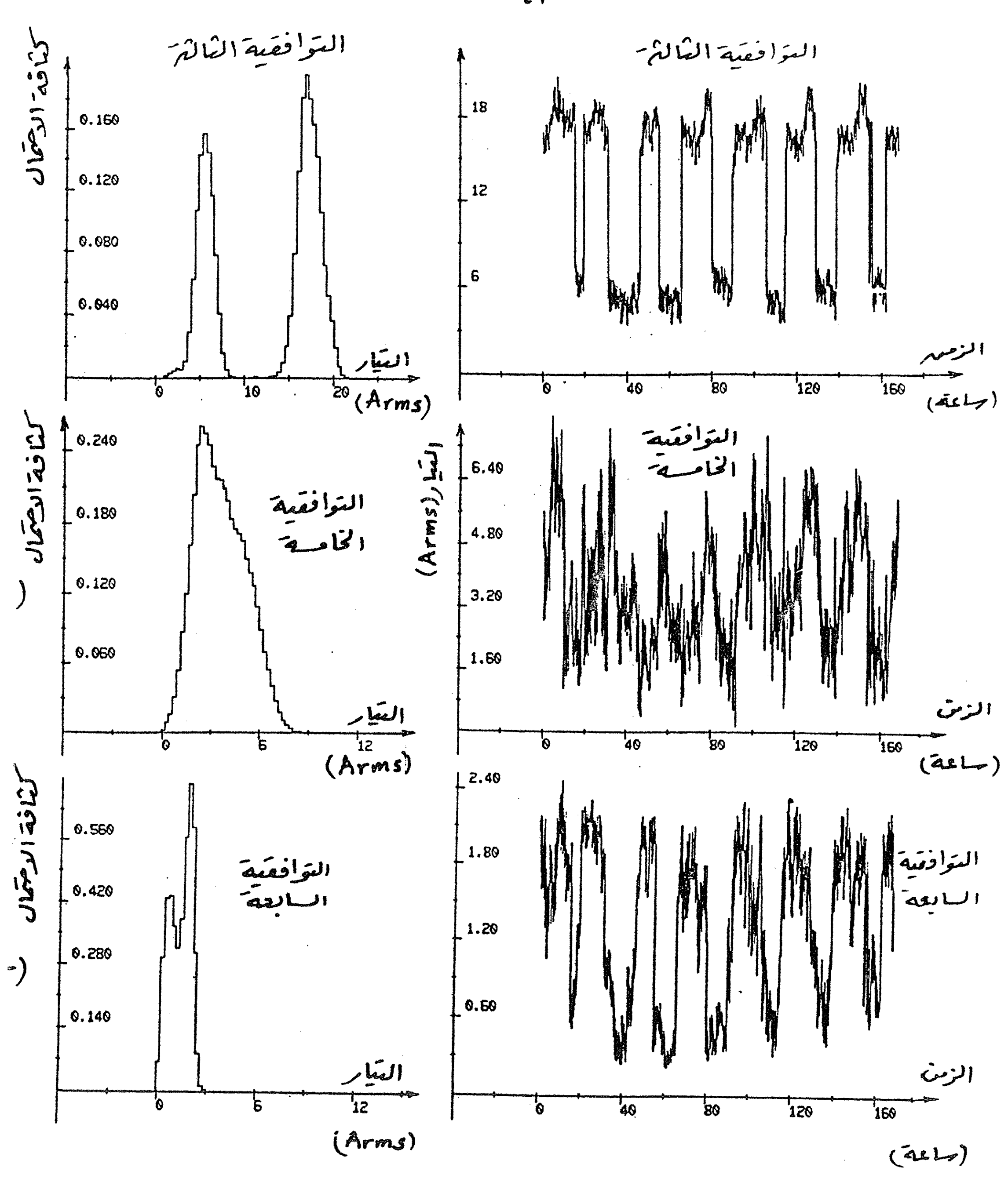
هى معاوقة التوصيلات بين العدادات ومقبس المخرج *Socket - outlet* (لاحظ شكل (٤٠-١))

٣ - معاوقة المعدات المستخدمة *Appliance impedance* (Z_D)



شكل (٣٧-١)

شكل (٣٨-١)



التوافقية الثالثة
كثافة الاحتمال
0.160
0.120
0.080
0.040
0
10
20
التيار
(Arms)
التوافقية الثالثة
18
12
6
0
40
80
120
160
الزمن
(ساعة)
كثافة الاحتمال
0.240
0.180
0.120
0.060
0
6
12
التوافقية الخامسة
التيار
(Arms)
التيار (Arms)
6.40
4.80
3.20
1.60
التوافقية الخامسة
0
40
80
120
160
الزمن
(ساعة)
كثافة الاحتمال
0.560
0.420
0.280
0.140
0
6
12
التوافقية السابعة
التيار
(Arms)
2.40
1.80
1.20
0.60
التوافقية السابعة
0
40
80
120
160
الزمن
(ساعة)

شكل (٣٩-١)

هى مجموعة المعاوقتين الآتيتين

- معاوقة الكابل المرن بين مقبس المخرج والمعدات المستخدمة .
- معاوقة الاسلاك الداخلية .

٤ - معاوقة الاسناد أو المرجع *Reference Impedance*

هى المعاوقة المستخدمة لحساب او قياس الاضطرابات *(Disturbance)* الحادثة من المعدات المستخدمة .

٥ - المركبة الأساسية *Fundamental Component*

هى المركبة ذات الدرجة رقم *1* لكمية دورية تم تحليلها على شكل تحليل "فورير" .

٦ - مركبة التوافقية *Harmonic Component*

هى المركبة ذات الدرجة اكبر من *1* لكمية دورية تم تحليلها على شكل تحليل "فورير"

٧ - درجة التوافقية *Harmonic order*

هى عدد رقمى ناتج من خارج قسمة تردد التوافقية على التردد الاساسى (مثلاً التوافقية التى ترددها ضعف التردد الاساسى تعرف بالتوافقية الثانية وبذلك فان درجة التوافقية تساوى الرقم *2*)

٨ - نسبة التوافقية *Harmonic ratio*

اذا اعتبرنا مركبة توافقية درجتها n لموجة مشوهة ، فان نسبة التوافقية هى النسبة بين قيمة جذر متوسط المربعات *(rms)* لمركبة هذه التوافقية الى قيمة *(rms)*للمركبة الاساسية لنفس الموجة (وعادة تكون نسبة مئوية) .

٩ - محتوى التوافقية *Harmonic content*

هى الكمية الناتجة من طرح المركبة الاساسية من الكمية المتغيرة .

١٠ - التشوه الكلى للتوافقية *Total harmonic distortion*

هو النسبة بين قيمة *(rms)* لمحتوى التوافقية وقيمة *rms* للمركبة الاساسية .

١١ - العامل الاساسى *Fundamental factor*

(لموجة مترددة غير جيبية)

هو النسبة بين قيمة *(rms)* للمركبة الاساسية وقيمة *(rms)* للكمية المترددة .

١٢ - زاوية التوافقية *The harmonic phase angle*

هى الزاوية بين جهد وتيار التوافقية عند تردد هذه التوافقية وتفيد معرفة هذه الزاوية فى حالة وجود أكثر من مصدر مشترك للتوافقيات على نفس القضبان ونحتاج للتعقب او البحث عن كل مصدر لهذه التوافقيات واذا امكن معرفة هذه الزاوية فيمكن تحديد اتجاه سريان قدرة التوافقية *(Direction of harmonic power flow)* وذلك باستخدام شكل رقم (٤١-١)

١٣ - الخاصية غير الخطية *Non - linear charactaristic*

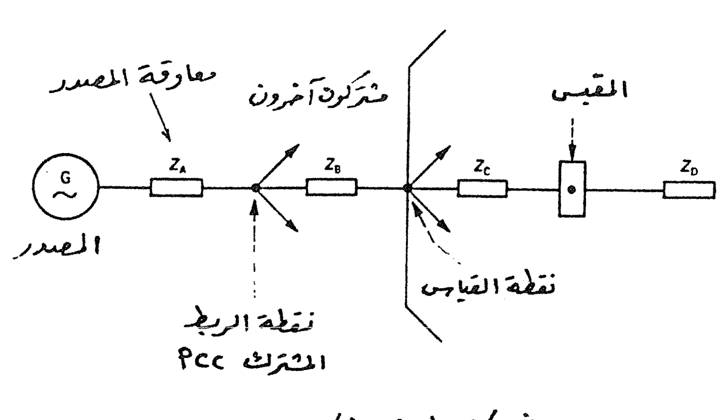
الخاصية الخطية للعلاقة بين الجهد والتيار هى الخط المستقيم المتماثل فى الربع الاول وتحقق العلاقة $V= RI$. اما الخاصية غير الخطية فهى التى لاتحقق العلاقة $V = RI$ ، وتعتبر اغلب مكونات ودوائر التيار المستمر عناصر ذات خاصية غير خطية ، فنجد فى شكل (٤٢-١) أ ان المنحنى *(a)* لخاصية مصباح التوهج الحرارى *(incadescent lamp)* ، ومنحنى *(b)* يبين خاصية الديود *(diode)* ، بينما يوضح منحنى *(c)* خاصية صمام تفريغ *(vacuum tube)* وتمثل العناصر غير الخطية كما فى شكل(٤٢-١)ب .

كما نجد فى الاشكال (٤٣-١) ، (٤٤-١) ، (٤٥-١) أمثلة للحصول على منحنى العلاقة بين V,I لتوصيلات مختلفة لعناصر غير خطية . ففى شكل (٤٣-١) تم توصيل عنصرين على التوالى وتخضع الدائرة للمعادلة :

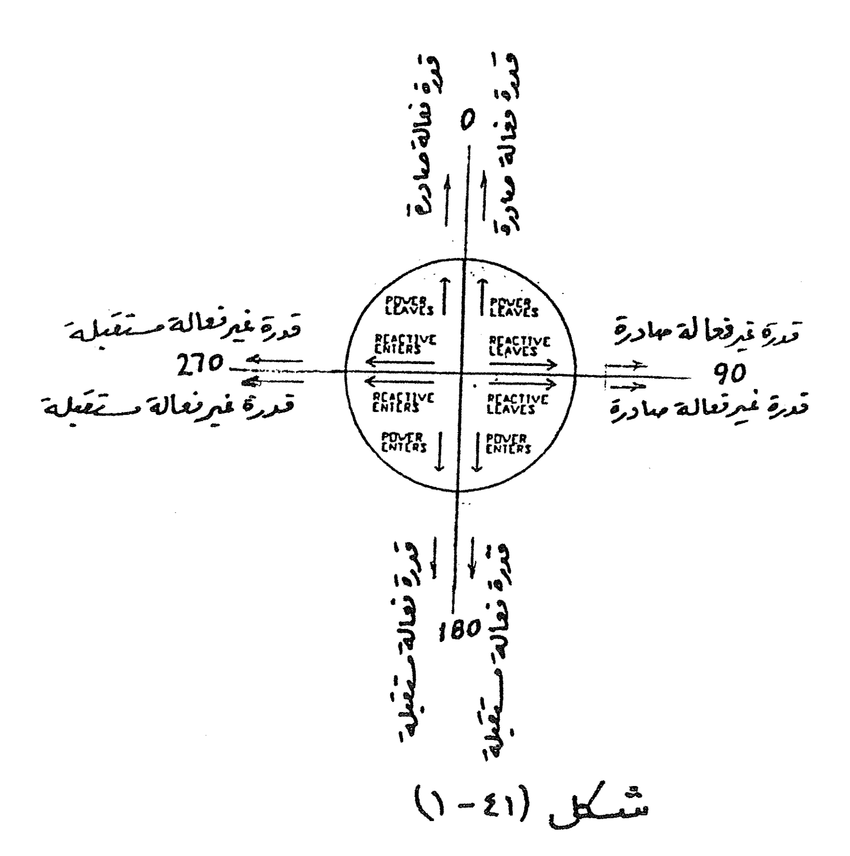
$$V = I R_1(I) + I R_2 (I)$$
$$= V_1 + V_2$$

حيث $R_2(I)$, $R_1(I)$ عنصران يتغيران بتغير التيار

ويوضح شكل (٤٤-١) توصيل عنصرين على التوازى وتخضع الدائرة للمعادلة



شكل (٤٠-١)



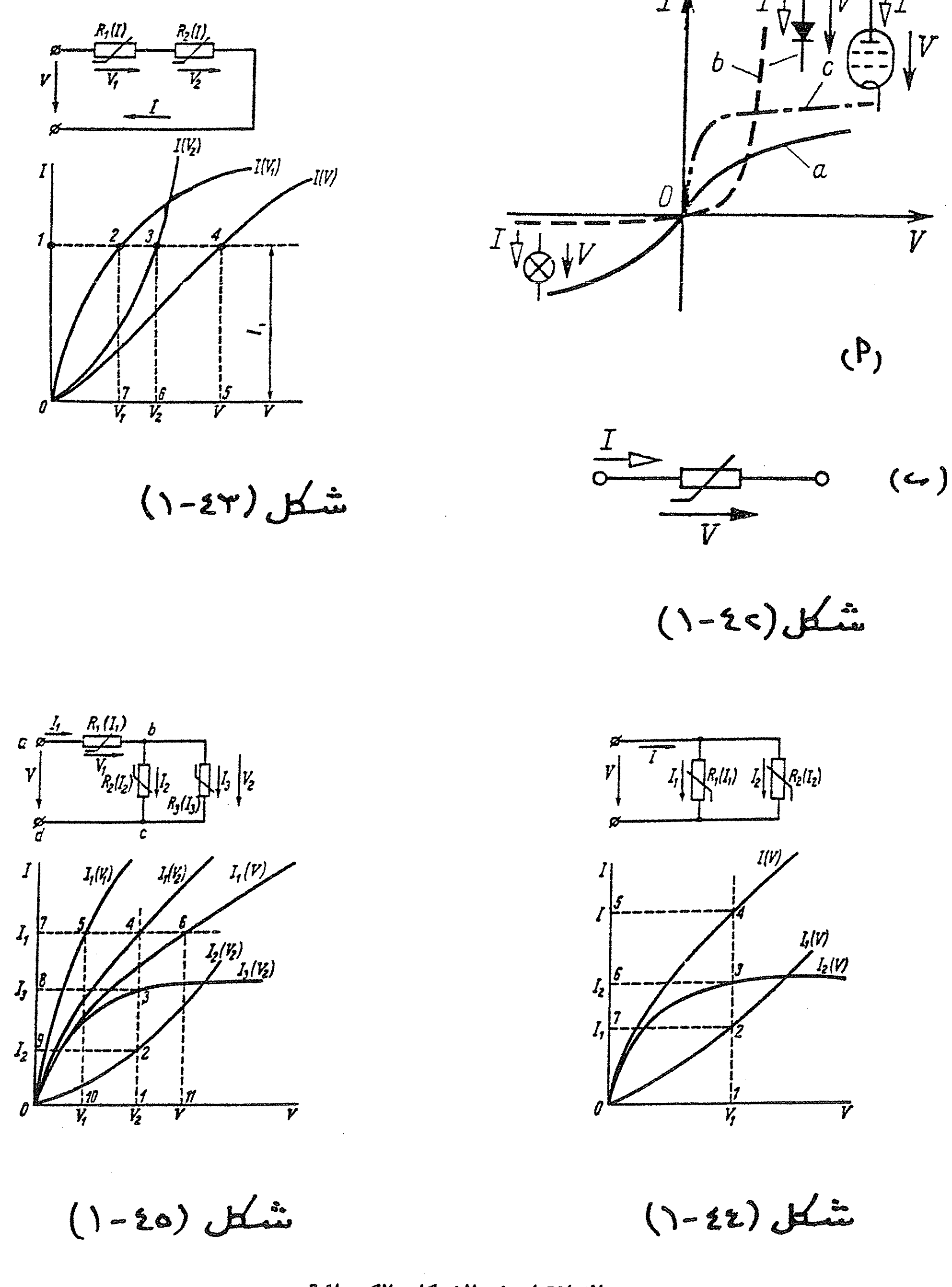
شكل (٤١-١)

$$I = I_1 + I_2$$

بينمايوضح شكل (٤٥-١) توليفة من عناصر غير خطية متصلة على التوالى والتوازى وتخضع الدائرة للمعادلتين

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$V = V_1 + V_2$$



شكل (١-٤٣)

شكل (١-٤٢)

شكل (١-٤٥)

شكل (١-٤٤)

الباب الثانى

مصادر التوافقيات

Sources of Harmonics

تعتبر الاحمال غير الخطية هى المصدر الاساسى لتيار التوافقيات فى الشبكات الكهربائية ، والتى تسبب تغييرات فى الجهد *(Voltage variation)* خلال ممانعة *(reactance)* الشبكة الكهربائية وتكون مسئولة عن تشوه شكل الموجة الجيبية لجهد المصدر عند نقطة الربط المشترك *(point of common coupling)* ، ويؤدى التشوه فى الموجات الجيبية الى حدوث تيار التوافقيات فى المعدات الكهربائية الخاصة بالمشتركين الاخرين المتصلين على نفس نقطة الربط المشترك للشبكة .. كذلك تتسبب تيارات التوافقيات فى اضافة الفقد الفنى فى مكونات الشبكة ..... .

وتصنف مصادر التوافقيات الى مصادر اساسية او تقليدية ومصادر جديدة ، والتى ظهرت مع التطورات الحديثة للصناعات المختلفة .

أ - مصادر التوافقيات الاساسية *Established Harmonic Sources*

١ - وجود التموجات *(ripples)* فى موجات الجهد للآلات الدوارة .

٢ - التغيير فى ممانعة *(reactance)* الثغرة الهوائية لخطوة القطب *(pole pitch)* فى الآلات المتزامنة .

٣ - تشوه موجة الفيض المغناطيسى في الآلات المتزامنة نتيجة التغير المفاجئ للحمل .

٤ - التوزيع غير الجيبى لموجة الفيض المغناطيسى فى الالات المتزامنة .

٥ - وجود تيارات المغنطة بمحولات القدرة .

٦ - الخصائص غير الخطية لاحمال الشبكة الكهربائية مثل : الموحدات *(rectifiers)* ، المبدلات *(Inverters)* ، ماكينات اللحام *(welders)* ، افران القوس *(arc furnaces)*، أجهـــزة التحكــم فـــى الجهـــد *(voltage controllers)* ، مبـــدلات التـــردد *(frequency convertors)* ....

ب - المصادر الجديدة للتوافقيات *New Harmonic Sources*

١ - أجهزة قياسات بقاء الطاقة *(Energy conservation measures)* ، مثل المستخدمة لتحسين كفاءة المحرك ومواءمة الاحمال ، والتى تتكون من اليكترونيات القوى *(Power electronics)* ، وتنتج هذه الاجهزة موجات تيار وجهد غير منتظمة وغنية بالتوافقيات .

٢ - معدات التحكم فى المحركات *(Motor control devices)* ، مثل معدات التحكم فى السرعة *(speed control)* المستخدمة فى وسائل النقل الكهربى .

٣ - نقل وتحويل القدرة الكهربائية بجهد عالى مستمر *(HVDC)*

٤ - ربط وسائل تحويل القدرة من الرياح والطاقة الشمسية بشبكات التوزيع .

٥ - استخدام المعوضات الاستاتيكية للقدرة غير الفعالة *(Static - var compensators)* ، والتى حلت محل المكثفات المتزامنة *(Synchronous condensors)* ، وتعتبر المصدر الدائم المتغير للقدرة غير الفعالة .

٦ - التوسع فى استخدام وسائل النقل الكهربى والتى تحتاج لمصدر تيار مستمر لشحن البطاريات .

٧ - استخدام مبدلات قدرة لتحويل *(d.c)* الى *(a.c)* *(dc/ac power converters)* فى المعدات الهيدروليكية المغناطيسية *(magneto - hydrodynamics)* ، وبطاريات التخزين *(storage batteries)* وخزانات الوقود *(fuel cells)* ..

٨ - استخدام مبدلات ذات دورات *(Cycloconverters)* للحصول على سرعات منخفضة وعزم عالى بالآلات

٩ - التحكم فى عناصر التسخين باستخدام نبضات مندفعة *(pulse - burst modulated heating elements)* للافران الكبيرة .

مما سبق يتضح انه قبل التوسع الكبير فى صناعة واستخدام اليكترونيات القوى ممثلة فى المبدلات الاستاتيكية *(Static converters)* او مبدلات *AC/DC(converters)* كان المصدر الاساسى للتوافقيات فى الشبكات الكهربائية ناتجاً من بعض عوامل التصميم ومن تشغيل الآلات الكهربائية *(electric machines)* والمحولات الكبيرة *(transformers)* وافران القوس الكهربى .

وقد تطورت صناعة وتصميم الآلات الكهربائية الدوارة والمحولات الكهربائية بحيث تعطى موجة جيبية نقية فى حالات التشغيل المستقرة *(Steady state)* ولا تسبب اية

تشوهات فى موجات الشبكة الكهربائية . ولكن فى حالات التشغيل الفجائية وغير المستقرة يحدث تكبير لقيم التشوهات المسموحة ، اى تزيد التشوهات او التوافقيات فى الشبكة الكهربائية .

وسنتعرض فيما يلى لتوضيح مصادر التوافقيات الآتية :

١ – الآلات الدوارة *(Rotating machines)*

٢ – محولات القدرة *(Power Transformers)*

٣ – محولات الجهد والتيار *(Voltage and current transformers)*

٤ – افران القوس *(Arc Furnaces)*

٥ – الاستعمالات المنزلية *(Household applicances)*

٦ – مصابيح الفلورسنت *(Fluorescent lighting)*

٧ – وسائل النقل الكهربائى *(Electrical traction)*

٨ – السخانات التأثيرية *(Induction heaters)*

٩ – اللحام الكهربى *(Electric welding)*

١٠ – مبنى الاعمال المحاسبية *(Accounting operations building)*

١١ – مبدلات *AC/DC* *(AC/DC converters)*

الآلات الدوارة ومحولات القدرة

تشترك الآلات الدوارة *(rotating machines)* والمحولات *(Transformers)* والممانعات *(reactors)* فى حدوث ارتفاع لقيم التوافقيات اذا حدث تشبع مغناطيسى للقلب الحديدى ويوضح شكل (١-٢) أ العلاقة بين الفيض Φ وتيار الاثارة *(i)* ، مع أخذ التخلف المغناطيسى *(hysteresis)* للقلب فى الاعتبار ، ويوضح شكل (١-٢) ب التغير فى التيار *(i)* بالنسبة للزمن *(t)* (المنحنى نو الخط الرفيع) ويكون منحنى العلاقة بين الفيض Φ والزمن مسطحاً *(Flat - top)* كما فى شكل (١-٢) جـ (المنحنى نو الخط الرفيع) ويمكن الحصول على هذا المنحنى برسم نقطة نقطة تبعاً للخطوط المتقطعة الموضحة بشكل (١-٢) ويكون الجهد الحادث على الملف نتيجة وجود الفيض متناسباً مع تغيير الفيض بالنسبة للزمن ، أى $d\Phi / dt$ ، ونحصل عليه بتفاضل المنحنى المرسوم بين Φ ، t ويوضح شكل (٢-٢) تغير الجهد *(e)* مع الزمن وكذلك تيار الاثارة مع الزمن . بمعنى آخر اذا كان تغير الجهد جيبياً فان الفيض ايضاً يتغير جيبياً ، كما فى شكل

(١-٢)جـ (المنحنى ذو الخط السميك) . وباستخدام هذا المنحنى يمكن رسم منحنى تيار الاثارة مع الزمن نقطة نقطة ، كما فى شكل (١-٢) ب (المنحنى ذو الخط السميك) ويلاحظ احتواء موجة التيار على قمم مدببة ، ويوضح شكل (٣-٢) موجتى التيار والجهد لهذه الحالة .

يتضح من ذلك ان التشبع المغناطيسى بالقلب الحديدى يؤدى الى تشوه موجتى التيار والجهد الحادث . وباستخدام تحليل فورير نجد أن هذه الموجة المشوهه تحتوى على التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة ..

المركبات التتابعية للتوافقيات *Sequance of harmonics*

تحلل التوافقيات بالنظام الثلاثى الاوجه المتماثل باستخدام المركبات المتماثلة *(Symmetrical components)* علماً بان النظام المتماثل لايحتوى على مركبات التوافقيات الزوجية *(even harmonics)* وتحتوى مركبات التتابعية الموجبة السالبة والصفرية على التوافقيات الفردية تبعاً للجدول رقم (١-٢) .

جدول(١-٢)

درجة التوافقية	مركبة التتابعية
١	الموجبة *(positive)*
٣	الصفرية *(Zero)*
٥	السالبة *(Negative)*
٧	الموجبة
٩	الصفرية
١١	السالبة
١٣	الموجبة
١٥	الصفرية
١٧	السالبة
١٩	الموجبة
٢١	الصفرية
٢٣	السالبة
٢٥	الموجبة
٢٧	الصفرية
٢٩	السالبة
٣١	الموجبة
.	.
.	.

ويلاحظ من جدول (١-٢) الآتى :

١ - تحتوى توافقيات التتابعية الموجبة *(Positive - sequence harmonic)* على الدرجات : ١ ، ٧ ، ١٣ ، ١٩ ، ٢٥ ، ٣١ ، ...

والتى يمكن وضعها على صورة *(6K + 1)* وبالتعويض عن $k = 0,1,2,...$ نحصل على درجات التوافقيات للتتابعية الموجبة .

٢ - تحتوى توافقيات التتابعية السالبة *(Negative - sequance harmonics)* على الدرجات ٥ ، ١١ ، ١٧ ، ٢٣ ، ٢٩ ، ...

والتى يمكن وضعها على صورة *(6k -1)* وبالتعويض عن $k = 1,2,3...$ نحصل على درجات التوافقيات للتتابعية السالبة .

٣ - تحتوى توافقيات التتابعية الصفرية *(Zero-sequence harmonics)* على الدرجات ٣ ، ٩ ، ١٥ ، ٢١ ، ٢٧ ....

والتى يمكن وضعها على صورة *(6K -3)* وبالتعويض عن $k = 1,2,3...$ نحصل على درجات التوافقيات للتتابعية الصفرية .

٤ - لاتحتوى توافقيات التتابعية للنظام الثلاثى الاوجه المتماثل على درجات التوافقيات الزوجية *(even)* .

٥ - تسمى الدرجات ٣ ، ٩ ، ١٥ ، ٢١ ، ٢٧ ... الموجودة فى توافقيات التتابعية الصفرية بالدرجات الثلاثية الفردية وهى الدرجات التى تقبل القسمة على ثلاثة *(Triple)*

نجد فى النظام الثلاثى الاوجه المتماثل ان الجهود بين الاوجه ونقطة التعادل *(line - to - natural voltage)* تحتوى على كل التوافقيات الموجودة فى الجهد بين خطين *(Line - to - line voltage)* بالاضافة الى توافقيات التتابعية الصفرية .

١ - الآلات الدوارة *Rotating Machines*

١-١ الآلات المتزامنة *Synchronous machines*

يكون المصدر الاساسى للتوافقيات فى الآلات المتزامنة كالآتى :

١ - شكل المجال *(field form)* ، خاصة بالآلات ذات الاقطاب البارزة *(Salient pole)* .

٢ - التغيير فى الممانعة *(reluctance)* نتيجة وجود مجارى *(Slots)* الملفات .

٣ - تشبع الدائرة المغناطيسية ومسار التسرب بالدائرة .

٤ - ملفات الاخماد (damper windings) والتى تكون على مسافات غير متماثلة .

ويمكن التحكم فى التوافقيات عن طريق الآتى :

١ - توسيع الثغرة الهوائية (air gap)

٢ - شكل الأقطاب .

٣ - غلق جزء من المجارى (Slots)

٤ - ميل الاقطاب او المجارى

٥ - عدد المجارى / وجه / قطب .

٦ - الف الوترى (Chording) للملفات .

٧ - احتكاك الملفات / المجارى .

وبعض هذه العوامل تؤدى الى ارتفاع كبير فى التكاليف . وعادة لايستخدم العامل رقم ٣ الخاص بغلق جزء من المجارى وذلك لعدم استخدام ملفات ملفوفة على اطار تشكيل (Form - wound coils) . بينما نجد ان العامل رقم ٤ الخاص بميل الاقطاب او المجارى يسبب مفقودات ويؤدى الى مشاكل ميكانيكية فى التركيب.

لذلك تتحول العوامل السابقة الى مايأتى

١ - الاحتياج الى نسب مناسبة بين المجارى المفتوحة وطول الثغرة الهوائية .

٢ - الاختيار المناسب لعدد المجارى / وجه / قطب وذلك لتكون الترددات الناتجة من المجارى (Slot frequency) مناسبة .

٣ - اللف الوترى واحتكاك الملفات / المجارى .

يمكن التخلص من بعض التوافقيات بتغيير الخطوة الوترية للملفات (Pitch of chorded coil) ولكن عادة يصاحب ذلك زيادة فى بعض التوافقيات الاخرى . بمعنى آخر ان اللف الوترى يعتبر عاملاً مفيداً لتحديد التوافقيات .

ومن أكثر العوامل العملية للتحكم فى توافقيات المجارى عامل احتكاك الملفات / المجارى وتنتج اهم التوافقيات بالآلات المتزامنة من الترددات الناتجة من المجارى والتى تعطى من المعادلة الآتية .

$$f_s = SN \pm f$$
$$= (2M \pm 1) f$$

حيث :

f_s = الترددات الناتجة من المجارى .

S = العدد الكلى لمجارى عضو المنتج *(armature)*

N= سرعة الآلة (دورة / ثانية *revolution / sec)*

f = التردد الاساسى

M = عدد المجارى / قطب

أ - المولدات المتزامنة *Synchronous generators*

تصمم المولدات المتزامنة لانتاج موجة جيبية نقية ، ومع افتراض ان الفيض المغناطيسى يكون موزعاً بالكامل على شكل جيبى حول الثغرة الهوائية *(air gap)* وبذلك تتولد قوة دافعة كهربائية *(emf)* بملف العضو المنتج لخطوة كاملة *(Full - pitched armature coil)* تخضع للعلاقة .

$$E = 2 \pi f \Phi \sin \omega t \quad \text{volt / turn}$$

حيث

Φ : الفيض الكلى / قطب

f : التردد ويساوى NP

N : السرعة *(Revolution / Sec)*

P : عدد الاقطاب الزوجية *(Pole Paris)*

ولكن فى الحقيقة ان وجود الملفات بمجارى *(Slots)* القلب الحديدى للدائرة المغناطيسية يعنى حدوث بعض التشوهات فى موجات الفيض المغناطيسى والقوتين الدافعة المغناطيسية والكهربائية ، كما فى شكل (٤-٢) . فعندما تدور الآلة ، فان القوة الدافعة الكهربائية الحادثة على الملفات تتناوب بين القطب الجنوبى *(North Pole)* والقطب الشمالى *(South Pole)* وأية تشوهات تؤثر على نصفى الدورة بالتساوى.عموماً نحصل من الآلة على نصفى دورة متماثلتين وبناء عليه تحتوى الموجة المركبة الناتجة على

توافقيات فردية فقط .

وعلى ذلك يكون توزيع المجال غير خطى ويخضع للمعادلة :

$$F(x) = F_1 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} + F_3 \sin \frac{3x2\pi x}{\lambda} + F_5 \sin \frac{5x2\pi x}{\lambda} + ...$$

حيث λ طول الموجة *(wave length)*

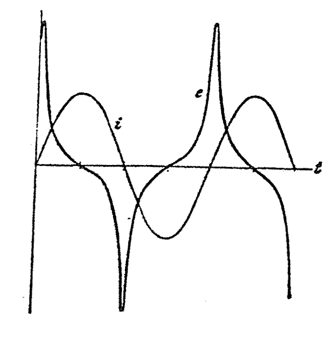
وتصبح معادلة القوة الدافعة الكهربائية بالملف تساوى

$$E(t) = E_1 \sin \omega t + E_3 \sin 3\omega t + E_5 \sin 5\omega t + ...$$

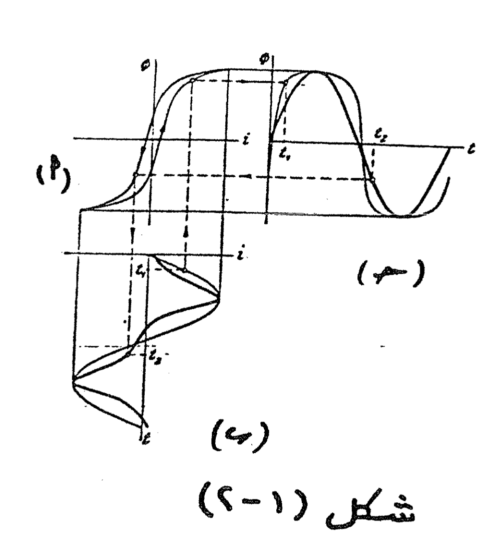
وبالاختيار المناسب للزاوية الكهربائية *(electrical angle)* بين المجارى ، وكذلك مناسبة اللف الوترى *(chorded)* للملفات يمكن تقليل او حذف التوافقيات .

وتلغى عادة درجات التوافقيات الفردية الثلاثية *(Triplens)* (مثل التوافقية الثالثة والتاسعة والخامسة عشر ...) بالآلات ثلاثية الاوجه عن طريق توصيلات الاوجه *(phase connetion)* ، وعادة يختار اتساع ملف *(Coil - span)* الآلة (وهى المسافة بين جانبى الملف والتى تقاس بعدد المجارى المحصورة بين جانبى الملف او بعدد الملفات المحصورة بينهما وأحياناً تسمى هذه المسافة باسم الخطوة الخلفية *(back pitch)*) وذلك لتقليل التوافقيتين الخامسة والسابعة .

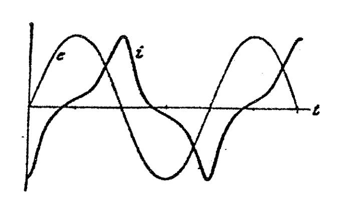
ويصاحب التشبع بالقلب حدوث تيارات التوافقيات بالملفات ويرجع ذلك الى منحنى العلاقة بين القوة الدافعة المغناطيسية *(H)* وكثافة الفيض *(B)* *(B-H cuve)* . وبتسليط القوة الدافعة الكهربائية *(emf)* الجيبية على الملف مع اهمال مقاومة الملف ، فان التيار الناتج يكون مساوياً للقوة الدافعة المغناطيسية الحادثة ومضاداً لها فى الاتجاه . ولكى نحصل على موجه تيار جيبية يجب ان يرتفع التيار بمعدل عالى قبل حالة التشبع وبمستوى أعلى من منحنى *B-H* ، وهذا واضح بشكل (٥-٢) ، ويلاحظ انه اذا كانت القوة الدافعة الكهربائية *(emf)* جيبية فان موجة الفيض المغناطيسى يجب ان تكون جيبية ، فمن شكل (٥-٢) نحصل على فيض عند النقطة *P* نتيجة تيار المغنطة *OA* *(Magnetizing current)* ، وعند النقطة *A'* والذى يقابل النقطة *P'* على المنحنى *(B-H)* ، كما يلاحظ من الشكل أيضاً شكل موجة تيار المغنطة والتى بتحليلها نجد انها تحتوى على التوافقية الثالثة .



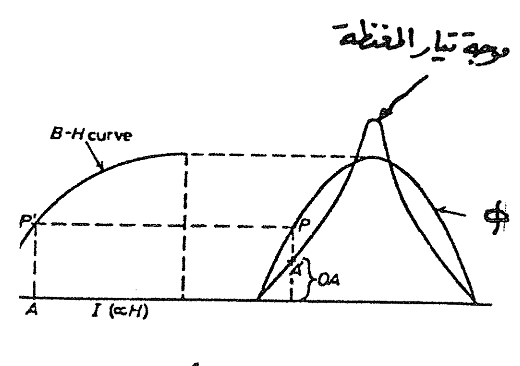
شكل (٢-٢)



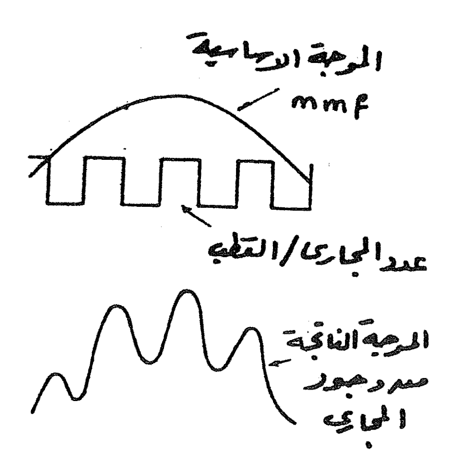
شكل (١-٢)



شكل (٣-٢)



شكل (٥-٢)



شكل (٤-٢)

ب - المحركات التأثيرية *Induction motors*

نحصل على سرعة المجال الدوار المتزامن *(Synchronous rotating field)* للعضو الثابت بالمحرك التأثيرى من المعادله

$$N_s = f_1 \lambda$$

حيث

f_1= التردد الاساسى

λ = طول الموجه *(wavelength)*

وتكون سرعة العضو الدوار *(rotor)*

$$N_r = f_1 \lambda (1-s)$$

حيث s = الانزلاق *(Slip)*

بينما يكون تردد العضو الدوار

$$f_r = sf_1$$

توجد توافقيات فى موجة القوة الدافعة المغناطيسية *(mmf)* للعضو الدوار وتكون خصائص التوافقية n بموجة *mmf* كالآتى :

- لها طول موجة تساوى $\frac{\lambda}{n}$
- لها سرعة تساوى $\frac{\lambda}{n}$ $\pm (sf)$ بالنسبة للعضو الدوار .
- لها سرعة تساوى $\{f \lambda (1-s) \pm (sf) \frac{\lambda}{n}\}$ بالنسبة للعضو الثابت

تحدث هذه التوافقية قوة دافعة كهربية *emf* فى العضو الثابت عند تردد يساوى السرعة على طول الموجة اى ان

$$f' = \frac{f \lambda (1-s) \pm (sf) (\lambda / n)}{(\lambda / n)} = f\{ n - s (n \pm 1)\}$$

وتستخدم الاشارة الموجبة عندما تتحرك التوافقية n للقوة الدافعة المغناطيسية للعضو المتحرك فى اتجاه عكس الموجة الأساسية .

وتحدث التوافقيات ايضاً كنتيجة لعدم التماثل الكهربى ، باعتبار حالة عدم الاتزان الكهربى لملفات العضو الدوار ، وتكون ملفات العضو الثابت متزنة بمجرد ان ينتج مصدر جهد التغذية مجال دوار نقى يدور بسرعة تساوى $\lambda\ f$.

وتنتج قوة دافعة كهربية *emf* بتردد الانزلاق فى العضو الدوار ، وحيث ان ملفات العضو الدوار غير متزامنة ، فان كلا من مركبتى التتابعية الموجبة والسالبة للتيار تمر محدثة مجال فى الاتجاه الامامى وآخر فى الاتجاه الخلفى،ويدوران بسرعة $\pm\ sf\lambda$ منسوبة للعضو الدوار ، وبسرعة $(f\ \lambda\ (1\text{-}s) \pm sf\lambda)$ منسوبة للعضو الثابت . ويكون تردد القوة الدافعة الكهربية للعضو الثابت الحادث من هذين المجالين $f\ ,\ f\ (1\text{-}2s)$ ، ويعتبر التردد $(1\text{-}2s)f$ هو تردد التوافقية ، وينتج الفعل المتبادل بين تيارات التردد الاساسى والتوافقيات ضربات عند التردد المنخفض $(2sf)$ تسجلها العدادات المتصلة بالمحرك ويوضح جدول (٢-٢) مثال لاعطاء فكرة عن قيمة تيار التوافقية كنسبة من القيمة الاساسية لمحرك تأثيرى ذى عضو دوار ملفوف *(wound - rotor induction motor)* يحتوى على عدد ٦ أقطاب ويدور بسرعة $0.9\ p.u$

كذلك يوضح الجدول اسباب حدوث هذه التوافقيات .

جدول(٢-٢)

التردد (هرتز)	تيار التوافقية كنسبة من التيار الاساسى (٪)	سبب حدوث هذه التوافقيات
٢٠	٪٣	عدم اتزان الاقطاب
٤٠	٪٢,٤	عدم اتزان الاوجه للعضو الدوار
٥٠	٪١٠٠	التبادل الاساسى *(Fundamental mutual)*
٨٠	٪٢,٣	عدم اتزان الاقطاب
٢٢٠	٪٢,٩	التبادل بالتوافقيتين الخامسة والسابعة
٣٢٠	٪٣	
٤٩٠	٪,٣	التبادل بالتوافقيتين الحادية عشر والثالثة عشر
٥٩٠	٪,٤	

٢ - محولات القدرة *Power Transformers*

يعتبر تشبع القلب هو السبب الرئيسى الذى يؤدى الى تشوه شكل الموجات فى المحولات الكهربائية ، فإذا حدث تشبع فان موجة الجهد الجيبية المسلطة على الملف الابتدائى للمحول تنتج تيار إثارة غير جيبى (مشوه) . ولدراسة الظاهرة المصاحبة لتشبع المحول سنتعرض للدائرة المكافئة للمحول والموضحة بشكل (٦-٢)

حيث :

E_g = جهد مصدر التغذية (تردد اساسى جيبى)

Z_g = معاوقة المصدر (لها قيم مختلفة تبعاً لتردد التوافقيات المختلفة)

E_p = الجهد الابتدائى

E_s = الجهد الثانوى

L_p = محاثة التسرب *(Leakage inductance)* للملف الابتدائى

L_s = محاثة التسرب *(Leakage inductance)* للملف الثانوى

M = المحاثة التبادلية *(Mutual inductance)* لملفات المحول .

E_h = مصدر توافقيات الجهد (بفرض عدم وجود معاوقة عند التردد الاساسى) له قيم مختلفة عند الترددات المختلفة .

I_{ex} = تيار الاثارة *(exciting current)* نتيجة المصادر E_g, E_h

ويراعى أن مصدر توافقيات الجهد E_h له توافقيات فردية *(odd)* وتقل قيمته كلما ازدادت درجة التوافقية . وهو تمثيل لحالة تشبع القلب والمصدر الاساسى للتوافقيات.

وفيما يلى دراسة تشوه تيار الاثارة والجهد لحالات مختلفة تبعاً للدائرة المكافئة بشكل (٦-٢):

١ - المصدر الجيبى باهمال المعاوقة : فى هذه الحالة فان موجة الجهد الابتدائى تكون جيبية بينما يحتوى تيار الاثارة على مركبات توافقيات تنتج من مصدر التوافقيات E_h والتى تؤدى الى مرور تيارات خلال معاوقة مصدر التوافقيات . وتحتوى موجة الجهد الثانوى على بعض التشوهات نتيجة للتسرب بين الملفات الابتدائية والثانوية . وتقدر توافقيات الجهد الثانوى اذا عرفت مركبات التوافقيات بتيار الاثارة بالاضافة الى معرفة ممانعة التسرب *(leakage reactance)* الابتدائية .

٢ - قيمة معاوقة المصدر صغيرة عند التردد الاساسى ، وما لانهاية عند ترددات التوافقيات :

فى هذه الحالة يخضع تيار الاثارة للتردد الاساسى فقط ، بينما يحتوى كل من الجهد الابتدائى والثانوى على توافقيات متعددة .

وعند توصيل الحمل *(Load)* على المحول ، كما فى شكل (٦-٢) ، فان تيارات التوافقيات تقسم بين الملفات الابتدائية والثانوية ، فإذا حدث لاحدى الدائرتين رنين *(resonant)* عند تردد توافقية معينة ، فان كل مركبات توافقيات تيار الاثارة تمر خلال ملفات المحول لهذه الدائرة .

كما يمكن ان تؤدى توافقيات الجهد بمصدر التغذية الى زيادة او انخفاض التوافقيات بتيار الاثارة خاصة المركبات المارة فى أحد ملفات المحول .

وقد تؤدى التوافقيات الموجودة بالمصدر بالاضافة الى حدوث رنين للمحول مع معاوقة المصدر عند نفس التردد الى تشوه كبير غير متوقع فى موجتى التيار والجهد .

خصائص الاثارة *Excitation Charactaristics*

يكون الحمل الابتدائى للمحول ، من الناحية العملية ، عند حالة اللاحمل متزناً ، عن طريق القوة الدافعة الكهربية الخلفية *(back emf)* نتيجة لإهمال تأثير مقاومة الملفات وممانعة التسرب عند التيارات الصغيرة جداً .

وعند أى لحظة فان الجهد المسلط كمصدر جيبى يكون

$$v_1 = - e_1 = - E_m \sin \omega t = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

ومن هذه المعادلة نحصل على معادلة الفيض Φ الآتية :

$$\Phi = - \int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$$

فمعنى ذلك ان الجهد الابتدائى الجيبي (v_1) ينتج موجة فيض جيبية عند حالة اللاحمل. ولكن نتيجة التناسب غير الخطى بين الفيض وتيار الاثارة (او تيار المغنطة)فان موجة التيار الابتدائى تكون جيبية مشوهه ، كما سبق ايضاحه . ويوضح شكل (٧-٢) تيار المغنطة *(Magnetizing current)* لمحول ذى قلب حديدى مغلق ، قد سلط عليه

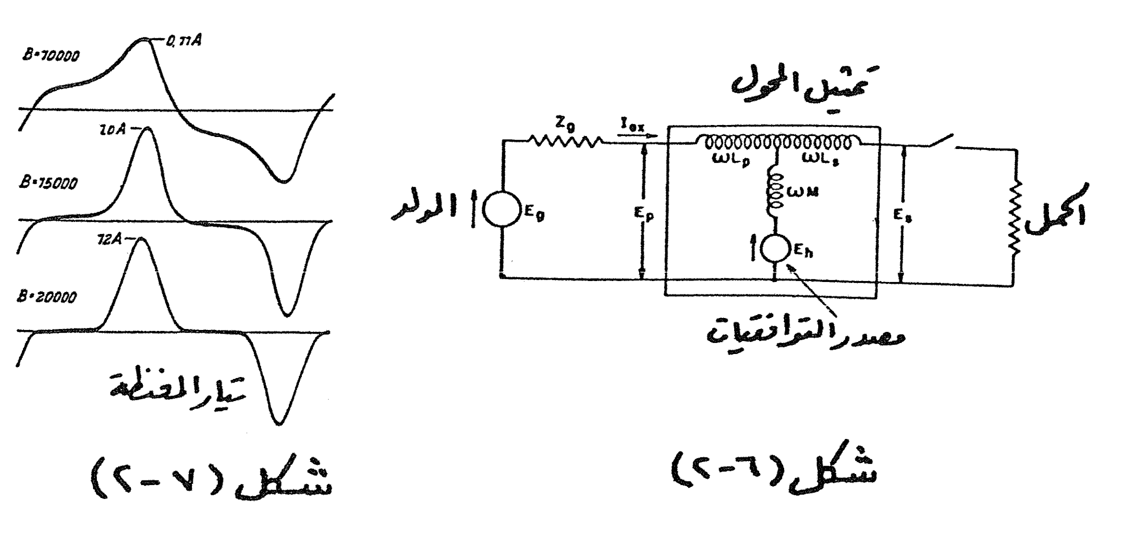
مصدر جيبى عند حالة اللاحمل ، وتم قياس التيار عند ثلاثة قيم لكثافة الفيض *(B)* وهى *10000, 15000, 20000 gauss* ومن المعروف ان المحولات تصمم لاسباب اقتصادية للوصول بمادة القلب الحديدى الى افضل الخصائص المغناطيسية ، وهذا يعنى ان قلب المحول المثالى النموذجى يستخدم الشرائح المصنوعة من صلب مسحوب فى اتجاه الحبيبات *(grain - oriented steel)* ويعمل عند أقصى كثافة فيض مغناطيسية ، فى حالة الاستقرار *(Steady state)* ، حوالى ١,٦ - ١,٧ تسلا ($Tesla = 10^4$ *gauss*) . واذا عمل المحول عند هذه القيمة لكثافة الفيض فانه يخضع لزيادة جهد ٣٠ ٪ ، كما يمكن ان تخضع مادة القلب لكثافة فيض بقيمة ١,٩ - ٢ تسلا وهى التى تسبب حالة التشبع نتيجة زيادة الجهد .

وتكون مشكلة حالة التشبع الناتجة من زيادة الجهد خطيرة اذا كان المحول يغذى وحدة تحويل تيار مستمر كبيرة حيث يصل الجهد بين طرفى وحدة التحويل الى حوالى ١٤٣ ٪ وباستخدام ثلاثة محولات أحادية الوجه موصله معاً لتكوين المحول الثلاثى ، من النوع ذى القلب ، فعندما يتشبع القلب فانه يحتوى على تيار مغنطة متماثل *(Symmetrical magnetizing current)* بالاضافة الى التوافقيات الفردية *(odd)* . وبتجاهل المركبة الاساسية وبفرض ان جميع تيارات التوافقيات الثلاثية الفردية *(Triplen)* تمر داخل الدلتا ، وعلى ذلك فان التوافقيات الحادثة تكون من الدرجات ٥ ، ٧ ، ١١ ، ١٧ ، ١٩ ، .... وبمعنى آخر تكون درجة التوافقيات $(6k \pm 1)$ حيث k رقم .

ويوضح شكل (٨-٢) العلاقة بين تيار المغنطة ومركبات التوافقيات مع جهد الاثارة *(exciting voltage)* بالمحول .

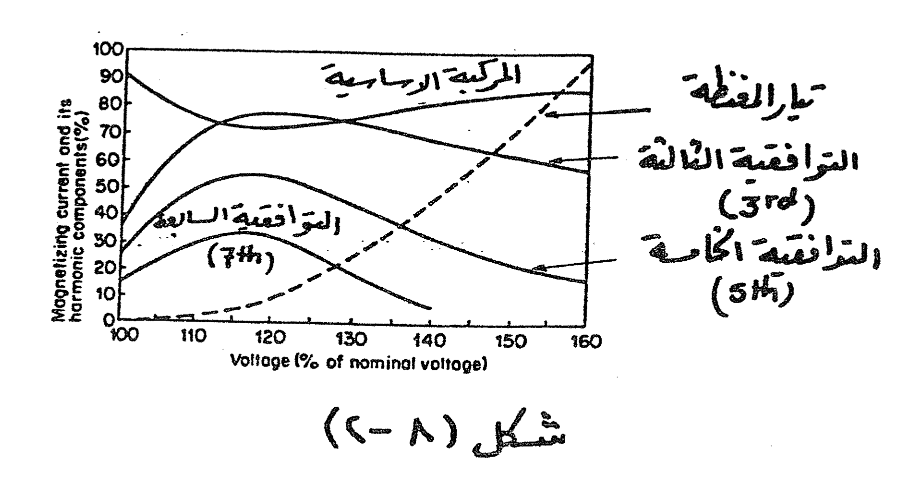
بينما يوضح شكل (٩-٢) نفس العلاقة بين تيار المغنطة ومركبات التوافقيات مع جهد الاثارة باستخدام محول ذى قلب صلب سليكونى ، مع ملاحظة الزيادة الملحوظة فى مركبات التوافقيات بتيار الاثارة مع الزيادة فى الجهد .

فعند تغذية محولات احادية الوجه من مصادر تغذية احادية الوجه يكون لها مسار معاوقة لمرور كل التوافقيات الفردية الناتجة من تشبع المحول،وعند توصيل محولات احادية الوجه لتكوين محول ثلاثى الاوجه ، مع تغذيته من نظام ثلاثى الاوجه فتمر فقط



شكل (٧ - ٢)

شكل (٦ - ٢)



شكل (٨ - ٢)

التوافقيات الفردية الغير ثلاثية *(non - triple)* والموجودة بتيار الاثارة لانها تمثل التتابعية الموجبة والتتابعية السالبة ، كما ذكرنا سابقاً ، وعلى ذلك فان مرور التوافقيات الثلاثية الفردية *(triple)* لتيار الاثارة ، والتى تكون عبارة عن التتابعية الصفرية ، يعتمد على حالة المحول وطريقة توصيل مصدر التغذية او دائرة الحمل .

كما يوضح جدول (٣-٢) وجود تيارات وجهود التوافقيات الثلاثية الفردية *(triple)* فى التوصيلات الشائعة الاستخدام لمحولات تحتوى على ملفين ، كذلك الدائرة المكافئة للمحول فى كل توصيلة .

ويكون مصدر التوافقيات ، فى الدائرة المكافئة ، عبارة عن التوافقيات الفردية الثلاثية فقط ، اى انها توافقيات التتابعية الصفرية (١٥،٩،٣، ...)

ويلاحظ من جدول (٣-٢) الآتى :

أ - للملفات المتصلة دلتا *(delta)* فان مسار التوافقيات ذات الدرجات ٣ ، ٩ ، ١٥،... لتيار الاثارة تمر خلال المحول كما فى الطرق ١ ، ٢ ، ٣ بالجدول .

ب - للملفات المتصلة نجمة مؤرضة *(Grounded - star)* فان مسار مركبة التوافقيات : ٣ ، ٩ ، ١٥ ... لتيار الاثارة تمر خلال الدائرة الخارجية ، اذا كانت الدائرة كاملة .

جـ - للملفات المتصلة نجمة غير مؤرضة *(ungrounded - star)* ، فانه لايوجد مسار لمركبة التوافقيات: ٣ ، ٩ ، ١٥ .. لتيار الاثارة سواء فى المحول او فى الدائرة الخارجية .

تظهر توافقيات الجهد الفردية الثلاثية *(Triple)* بين الخط ونقطة التعادل بينما يعتمد توزيع الجهد بين نقطة التعادل والارضى وبين الخط والارضى على المعاوقة بين هذه الاطراف والارضى وعلى ذلك فان :

أ - اذا كانت نقطة التعادل مؤرضة فان جهود التوافقيات الفردية الثلاثية تظهر بين اطراف الخط والارضى وتؤثر على الدائرة الخارجية .

ب - اذا كانت نقطة التعادل غير مؤرضة ، فان جهود التوافقيات الفردية الثلاثية تظهر بين نقطة التعادل والارضى ولاتوثر على الدائرة الخارجية .

جدول (٣-٢)

الحالة CASE	المجموعة الاتجاهية للمحول الثانوى / الابتدائى CONNECTIONS PRIMARY	SECONDARY	الدائرة المكافئة للمحول فى حالة التوافقيات الثلاثية EQUIVALENT CIRCUIT FOR TRIPLE HARMONICS	التوافقيات الثلاثيه لجهد المولد TRIPLE-HARMONIC VOLTAGE TO GND. AT STAR POINT	التوافقيات الثلاثية للدائرة CIRCUIT TRIPLE HARMONICS — التيار CURRENTS PRIMARY	CURRENTS SECONDARY	الجهد VOLTAGES PRIMARY	VOLTAGES SECONDARY
1				---	NONE	NONE	NONE	NONE
2				SMALL	NONE	NONE	NONE	NONE
3				---	NONE	(a) SMALL (b) NEGLIGIBLE	NONE	SMALL
4				---	(a) LARGE (b) SMALL	(a) LARGE (b) SMALL	(a) SMALL (b) LARGE	(a) SMALL (b) LARGE
5				(a) SMALL (b) LARGE	(a) LARGE (b) SMALL	NONE NONE	(a) SMALL (b) LARGE	(a) SMALL (b) LARGE
6				LARGE	NONE	NONE	LARGE	LARGE

(a) فى حالة المعاوقة الصغيرة لمسار التوافقيات الثلاثيه.

(b) فى حالة المعاوقة الكبيرة لمسار التوافقيات الثلاثية.

التوافقيات بالتيار الدفعى (Inrush Current Harmonics)

عند فصل المحول ، يمكن ان تكون كثافة الفيض المتبقى (Residual flux density) بالقلب لها قيمة إما $(+B_r)$ او $(-B_r)$ أو (Zero) وعند اعادة تغذية المحول فان كثافة الفيض تخضع للشكل رقم (١٠-٢) ، ويمكن ان يصل مستوى أقصى كثافة للفيض بقيمة $(2B_{max})$ او $(B_r + 2B_{max})$ وتصمم المحولات عادة بحيث تتغلب على قيمة الذروة لكثافة الفيض والتى تكون حوالى ٤ , ٣ او ٧ , ٤ تسلا على التوالى . وبالمقارنة بمستوى كثافة الفيض عند حالة التشبع والتى تكون حوالى ٢,٠٥ تسلا والمستنتجة من حالة الاثارة الزائدة المتماثلة (Symmetrical over excitation) ، والتى ينتج عنها حالة تشبع زائدة وأيضاً أمبير - لفات زائدة بالقلب . ويؤثر هذا فى ارتفاع تيار المغنطة (Magnetizing current) بنسبة تتراوح من ٥ الى ١٠ ٪ من القيمة المقننة ، ويوضح شكل (١١-٢) التيار الدفعى لمحول قدره ٥ م.ف.أ - وكثافة الفيض المتبقية B_r تساوى ١,٣ تسلا ويكون التناقص فى التيار الدفعى مع الزمن بدلالة مقاومة الملف الابتدائى للمحول . ولمحولات القدرة الكبيرة فان التيار الدفعى يستمر لعدة ثوانى نتيجة انخفاض مقاومة ملفاتهم الابتدائية .

وباستخدام تحليل فورير امكن الحصول على التوافقيات الموجودة بالتيار الدفعى للمحول والموضح بشكل (١١-٢) ومثلت كنسبة من التيار المقنن للمحول كما فى شكل (١٢-٢).

ومما سبق نجد ان المحول يتغذى بموجة جهد جيبية متماثلة وينتج به تيار إثارة متماثل يحتوى فقط على توافقيات فردية (odd) ، واذا وصلنا حمل خطى (Linear) او غير خطى (non-linear) فان تيار الاثارة يظل محتوياً على التوافقيات الفردية .

وفى حالة عدم الاتزان ، يحتوى تيار الاثارة للمحول على مركبات التوافقيات الفردية والزوجية ، ويمكن حدوث حالة عدم الاتزان نتيجة توصيل اية احمال على المحول،والتى تكون متقدمة على مركبة التيار المستمر (d.c component) للتيار بالاضافة الى المركبات الجيبية .

وتكون قيمة توافقيات التيار كدالة فى كثافة الفيض بالدائرة المغناطيسية (القلب) بالمحول ، وتزداد قيمة التوافقيات (كنسبة من قيمة المركبة الاساسية) كلما ازدادت قيمة كثافة الفيض للقلب ، وبمعنى آخر كلما ازدادت حالة التشبع للقلب .

ويمكن تلخيص مشكلات وجود توافقيات التيار بالمحولات فى الآتى :

١ - زيادة فى مفقودات النحاس والحديد بالمحول .

٢ - احتمال حدوث تداخل *(interference)* مغناطيسى مع دوائـر الاتصالات السلكية .

بينما تكون مشكلات وجود توافقيات الجهد بالمحولات كالآتى :

١ - يؤدى الى زيادة الاجهادات *(stress)* الكهربائية فى المواد العازلة .

٢ - يحدث تداخلاً كهرومغناطيسياً مع دوائر الاتصالات السلكية .

٣ - يمكن حدوث رنين*(Resonance)* عند تردد هذه الجهود مع تردد الدائرة التى تحتوى على ممانعة الحث الذاتى لملفات المحول والسعوية الخاصة بخط التغذية المتصل بها .

٣ - محولات الجهد والتيار *(Voltage and current transformers)*

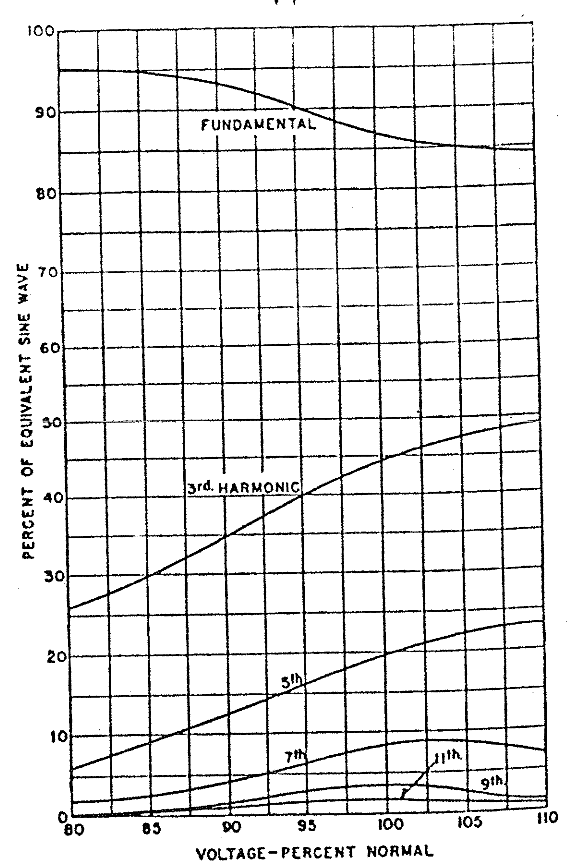
حيث ان محولات الجهد لايحدث لها تشبع خلال الاعطال ، لذا فانها لاتصدر اية توافقيات لدوائرها الثانوية ، ولكن نتيجة لحدوث تشبع لمحولات التيار فانها تصدر توافقيات تيار فى دوائرها الثانوية خلال الاعطال ، تؤدى الى الاشتغال الخاطئ لمتممات الوقاية ضد الاعطال الارضية *(phase to ground)* .

٤ - أفران القوس الكهربى *(Electric - arc - furnace)*

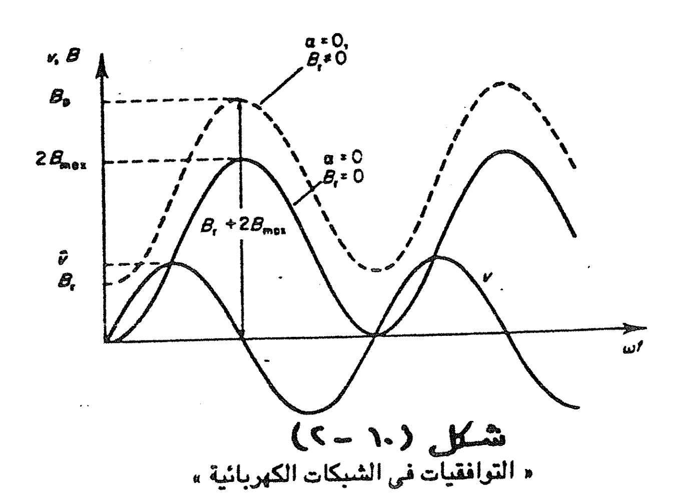
تعتمد فكرة تشغيل أفران القوس الكهربى على تكرار حدوث دائرة القصر *(short circuits)* بين الاقطاب *(electrodes)* والخردة *(Scrap - metal)* المراد انصهارها فى الفرن ويكون القوس ملامساً للمادة المراد صهرها فيمرر تيار عالى بين القطبين خلال المادة، ويقابل التيار العالى جهد منخفض . وعند انصهار المادة وابعادها عن القطب عندئذ ينطفئ القوس ولايمر تيار وخلال دورة الانصهار يتغير التيار عشوائياً عن طريق حدوث دائرة القصر بين وجهين او الثلاثة اوجه او عن طريق دائرة مفتوحة لاحد الاوجه . ويوضح شكل (١٣-٢) تيار وجهد الوجه لفرن القوس وبتحليل هذا التيار نجد ان الافران تنتج بصفة مستمرة جميع التوافقيات الزوجية والفردية والموضحة بشكل (١٤-٢) ويمكن ان تحتوى ايضاً على التوافقيات الفرعية *(Subharmonics)* .

وبذلك يكون السبب فى حدوث التوافقيات هو السلوك غير المتزن وغير المستقر

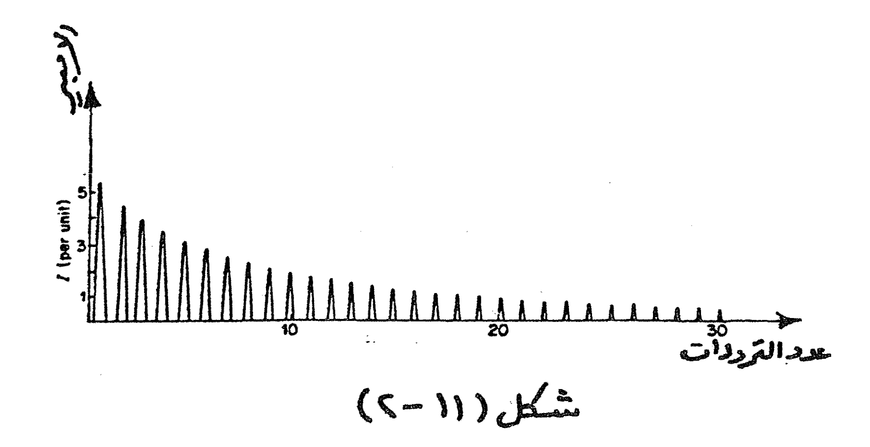




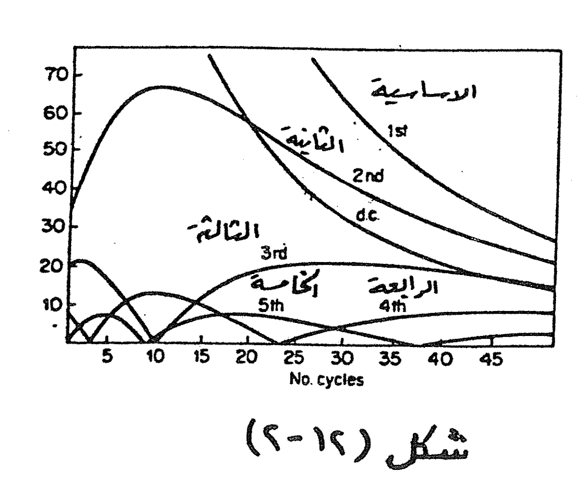
شكل (٩-٢)



شكل (١٠ - ٢)
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



شكل (١١-٢)



شكل (١٢-٢)

لاقواس الثلاثة اوجه وايضاً للخاصية الغير خطية بين التيار والجهد . بالاضافة الى ان التغيير فى الجهد نتيجة التغير المفاجئ فى طول القوس ينتج امتداد للترددات *(spread of frequencies)* تكون غالباً فى حدود من ٠,١ - ٣٠ هرتز حول التوافقيات الموجودة . ويحدث هذا خلال الانصهار نتيجة استمرار حركة المادة المنصهرة ونتيجة الفعل المتبادل بين القوى الكهرومغناطيسية بين الاقواس .

ويكون سلوك القوس خلال دوره تنقية *(refining)* المعدن افضل ولكن يحتاج طول القوس لعملية ضبط نتيجة تموجات سطح المعدن المنصهر .

ويوضح شكل (١٥-٢) تسجيل للعلاقة بين التيار والتردد خلال دورتى الانصهار والتنقية للخردة المراد انصهارها فى فرن القوس الكهربى وكذلك تسجيل المركبة الاساسية للتيار وتوافقيات التيار .

وتتغير مستويات تيارات التوافقيات تغيراً كبيراً مشوهاً مع الزمن ولذلك يفضل تسجيل التوافقيات مع التيار على شكل التسجيل الاحصائى *(probabilistic plots)* كالموضح بشكل (١٥-٢)، و قد اختلفت المراجع فى تحديد متوسط مستويات التوافقيات *(average harmonic levels)* لافران القوس الكهربى ، ويوضح جدول (٤-٢) حدود هذه المستويات كنسبة من التيار الاساسى .

جدول(٤-٢)

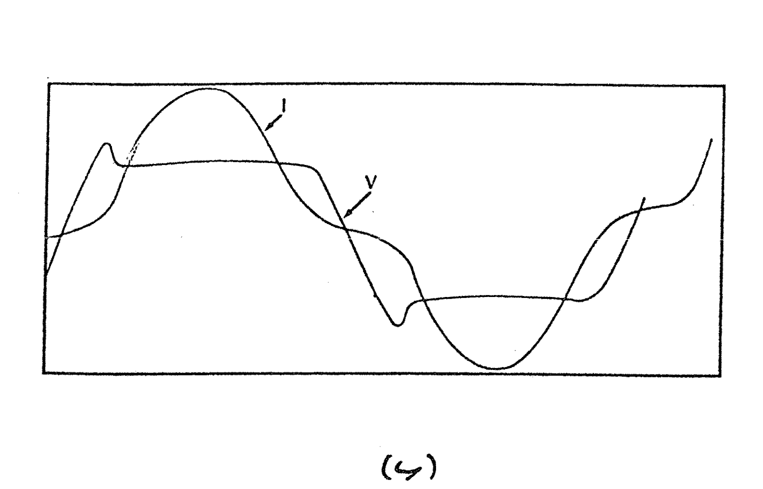
درجة التوافقية	حدود متوسط مستوى التوافقية كنسبة من التيار الاساسى
٢	٣,٢ - ٤,٥
٣	٤ - ٤,٧
٤	١,١ - ٢,٨
٥	٢,١ - ٤,٥
٦	٠,٦ - ١,٧
٧	١ - ١,٦
٨	,٤ - ١,١
٩	,٠٥ - ١
١٠	اكبر من ٠,٥ - اكبر من ١

قضبان التوزيع

I

V

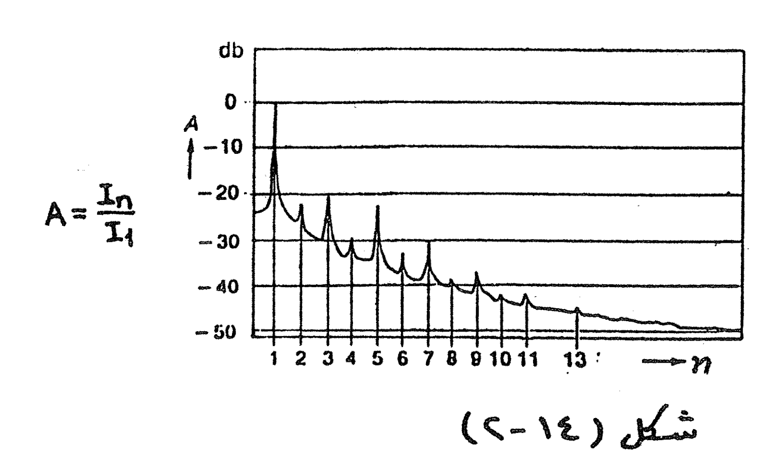
(أ)



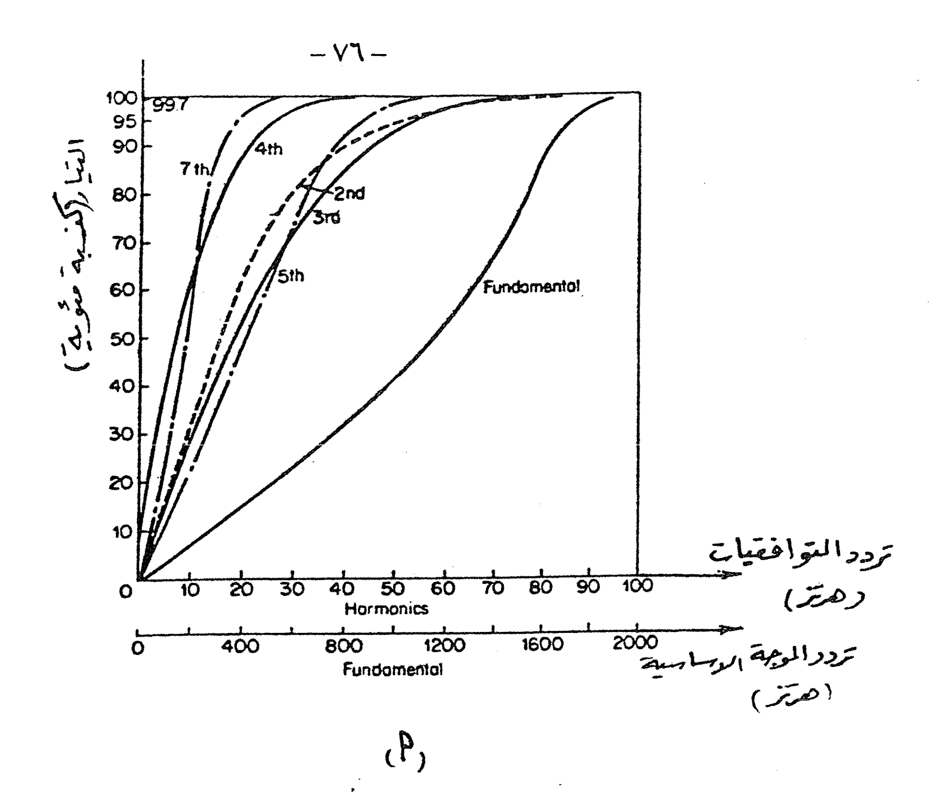
(ب)

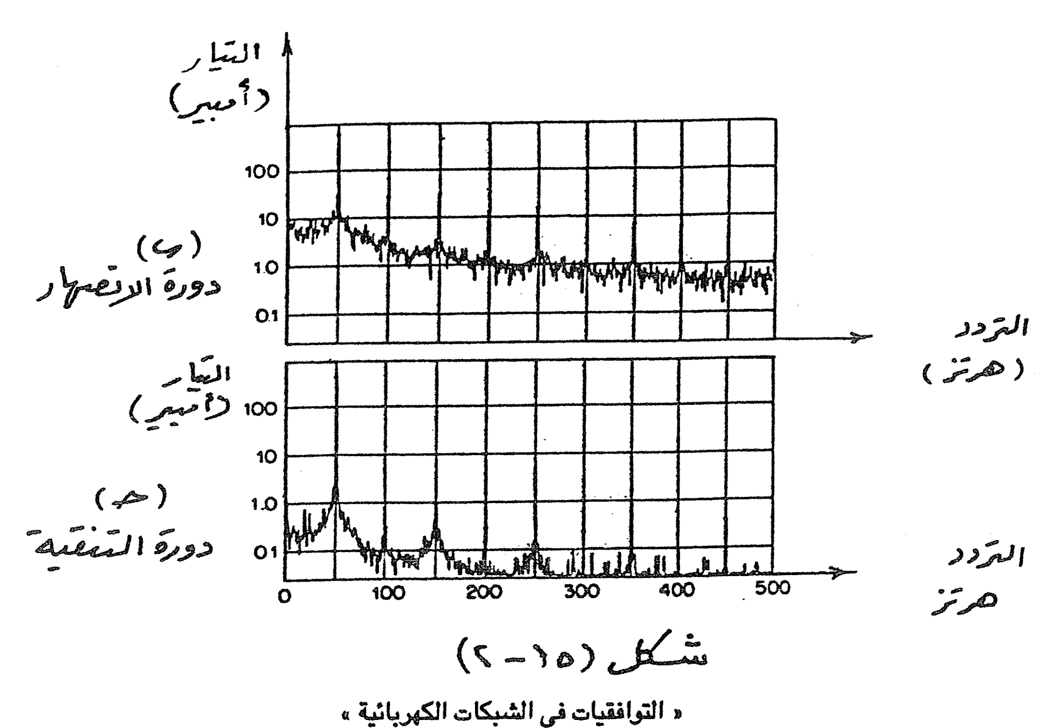
شكل (١٣-٢)

$$A = \frac{I_n}{I_1}$$



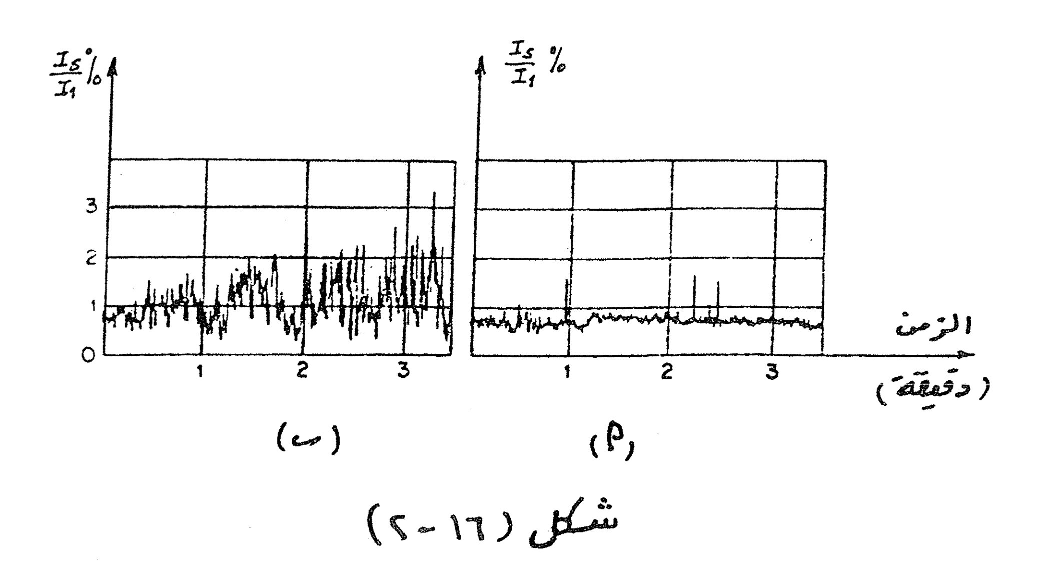
شكل (١٤-٢)



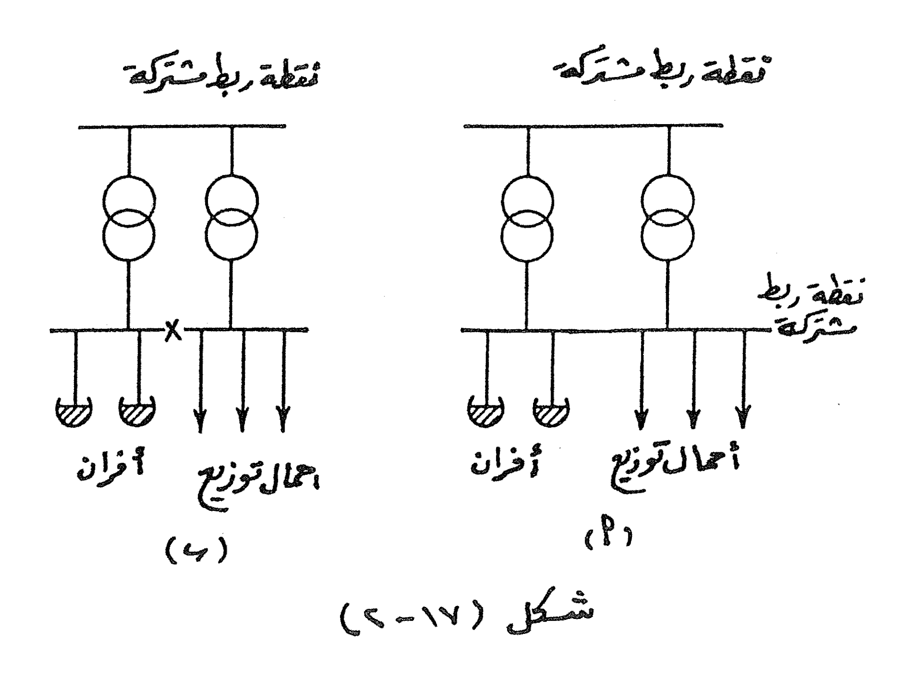


شكل (١٥ - ٢)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



شكل (٢-١٦)



شكل (٢-١٧)

كما يوضح شكل (١٦-٢) أ العلاقة بين الزمن والتوافقية الخامسة كنسبة من التيار الاساسى فى دورة التنقية ، بينما نجد أن شكل (١٦-٢) ب يوضح العلاقة فى حالة دورة الانصهار لافران القوس الكهربى المبينة شكل (١٧-٢) أ والتى يلاحظ فيها اتصال أحمال توزيع *(Distributed load)* على نفس القضبان المغذية للافران ويختلف تأثير التوافقيات على هذه الاحمال خلال دورتى الانصهار والتنقية كما أن أبسط طرق العلاج ان تفصل الاحمال عن الافران كما فى شكل (١٧-٢) ب .

٥ - الاستعمالات المنزلية *(Household appliances)*

تعتبر المعدات الكهربائية المنزلية احد مصادر التوافقيات بالشبكة الكهربائية ومن أمثلة هذه المعدات :

- معدات المطبخ والتسخين التى تعتمد على محرك او وسط مغناطيسى .
- الادوات الكهربائية المحمولة *(Portable tools)*
- معدات خفض شدة الاضاءة *(Light dimmers)*
- أجهزة الاستقبال بالراديو والتليفزيون *(Radio & Television recivers)*

ويكون مصدر التغذية :

- الجهد المقنن حتى ٢٤٠ ڤولت - ٥٠ هرتز - من مصدر أحادى الوجه (يحتوى على سلكين او ثلاثة اسلاك *(Two or three - wire)* .

او - الجهد المقنن حتى ٤١٥ فولت - ٥٠ هرتز من مصدر ثلاثى الاوجه (يحتوى على ثلاثة او اربعة اسلاك *(Three or four - wire)*

وتكون وسيلة التحكم الالكترونية *(electronic control)* بهذه المعدات هى مصدر الاضطرابات فى الشبكة الكهربائية اى حدوث توافقيات بالشبكة وفيما يلى مثالاً مأخوذ من مجلة *IEEE No. 1 Jan. 1993* .

مبنى سكنى *Apartment Building*

يمثل الحمل السكنى الكبير بمبنى يتألف من عدة وحدات سكنية ، يغذى بمصدر تيار كهربى من محول ثلاثى الاوجه *13.8/0.208 kv* ، وتم تسجيل الاحمال خلال ١٦٠ ساعة كما فى شكل (١٨-٢) كعلاقة بين الزمن والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة وتمثل

الاحمال بالسخانات *(heaters)* والمواقد الكهربية *(Electric ranges)* وترجع القدرة غير الفعالة الى احمال الثلاجات *(refrigerators)* والاضاءة بالفلورسنت *(Fluorescent lights)* ، ومحركات المصاعد *(elevator motors)* وقد تم تسجيل توافقيات الجهد والتيار بطريقة التوزيع الاحصائى *(Statistical distributions)* (وهو الرسم البيانى النسيجى او رسم بيانى مؤلف من سلسلة من المستطيلات او رسم احصائى *(Histogram)*) .

ويوضح شكل (١٩-٢) الرسم البيانى النسيجى للمركبة الاساسية والتوافقيتين الثالثة والخامسة لموجة جهد المصدر . كذلك يوضح جدول (٥ -٢) مستويات توافقيات الجهد المقاسة (جذر متوسط المربعات *rms*) ومن هذا الجدول يتضح ان التشوه الكلى للتوافقيات *Total Harmonic Distortion* أى *THD %* ، تنحصر بين ٤,٠ ٪ و ٢,٧ ٪

جدول (٥ -٢) مستويات توافقيات الجهد *(V rms)*

درجة التوافقية *Harmonic order*	ادنى قيمة *Min*	القيمة المتوسطة *Mean*	أقصى قيمة *Max.*
١	١١٦	١١٩,٢	١٢١,٥
٢	-	٠,١	٠,٢
٣	٠,٠٥	٠,٨	١,٢
٥	-	٠,٨٥	١,٩
٧	٠,٢	٠,٣٥	٠,٦٢
٩	-	٠,١٢	٠,٢٨
١١	-	,٠٦	٠,٠٣
THD %	٠,٤	١,٢٥	٢,٧

ويوضح شكل (٢٠-٢) تيارات التوافقيات الناتجة من المستهلكين الى الشبكة الكهربائية بدلالة الكثافة الاحتمالية *(probability density)* مأخوذة من أحمال المبنى المسجلة بشكل (١٨-٢) . وقد وجد ان اقصى تشوه كلى لتوافقيات التيار *(THD%)*

يساوى ٦,٣٨ ٪ بينما القيمة المتوسطة تساوى ٦,١١ ٪ ويلاحظ اختلاف الرسم البيانى النسيجى *(histograms)* لنماذج التيارات بشكل (٢٠-٢) عن نماذج الجهود بشكل (١٩-٢) وهذا راجع الى ان توزيع الجهد عند قضبان المستهلكين *(customers bus)* لايتحدد فقط بتيارات التوافقيات الناتجة عن طريق هذا المستهلك ولكن ايضاً نتيجة الاحمال الاخرى المتصلة على نفس القضبان .

ويوضح جدول (٦-٢) القيمة المتوسطة وقيمتى ادنى وأقصى تيار التوافقيات (امبير $A_{rms.}$)ويلاحظ قيم الزوايا بين تيار وجهد التوافقية .

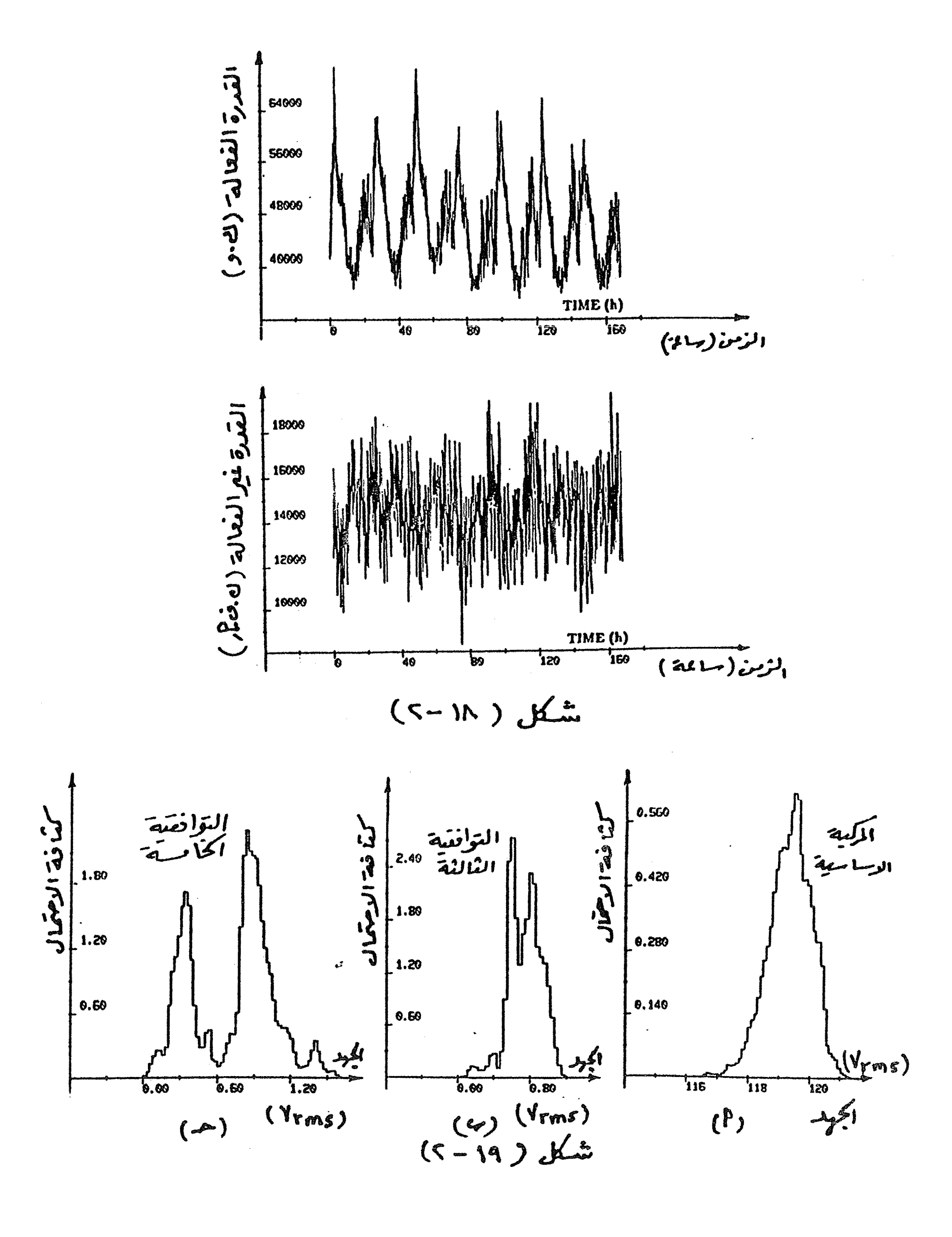
جدول (٦-٢) تيار التوافقيات *(A rms)*

درجة التوافقية	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٣٠٠ ∠-٢٠°	٣٥٠ ∠-١٥°	٦٣٠ ∠-١٠°
٢	٠,٤	٤	٨
٣	-	١٢ ∠١١٠°	٢٧ ∠١٢٠°
٥	١	١٧ ∠-١٤٠°	٢٨ ∠-١٦٠°
٧	-	٢,٩ ∠١٧٠°	٦,١ ∠١٥٠°
THD %	-	٦,١١	٦,٣٨

ويوضح شكل (٢١-٢) التيار المار بمسار التعادل مقاساً لمدة ١٦٠ ساعة والذى يحتوى على مركبات التوافقيات الثلاثية الفردية *(triple)* ، ونلاحظ ان الموجة تتكرر دورياً كل ٢٤ ساعة نتيجة استخدام الاضاءة بالفلورسنت .

٦ - مصابيح الفلورسنت *(Fluorescent Lamps)*

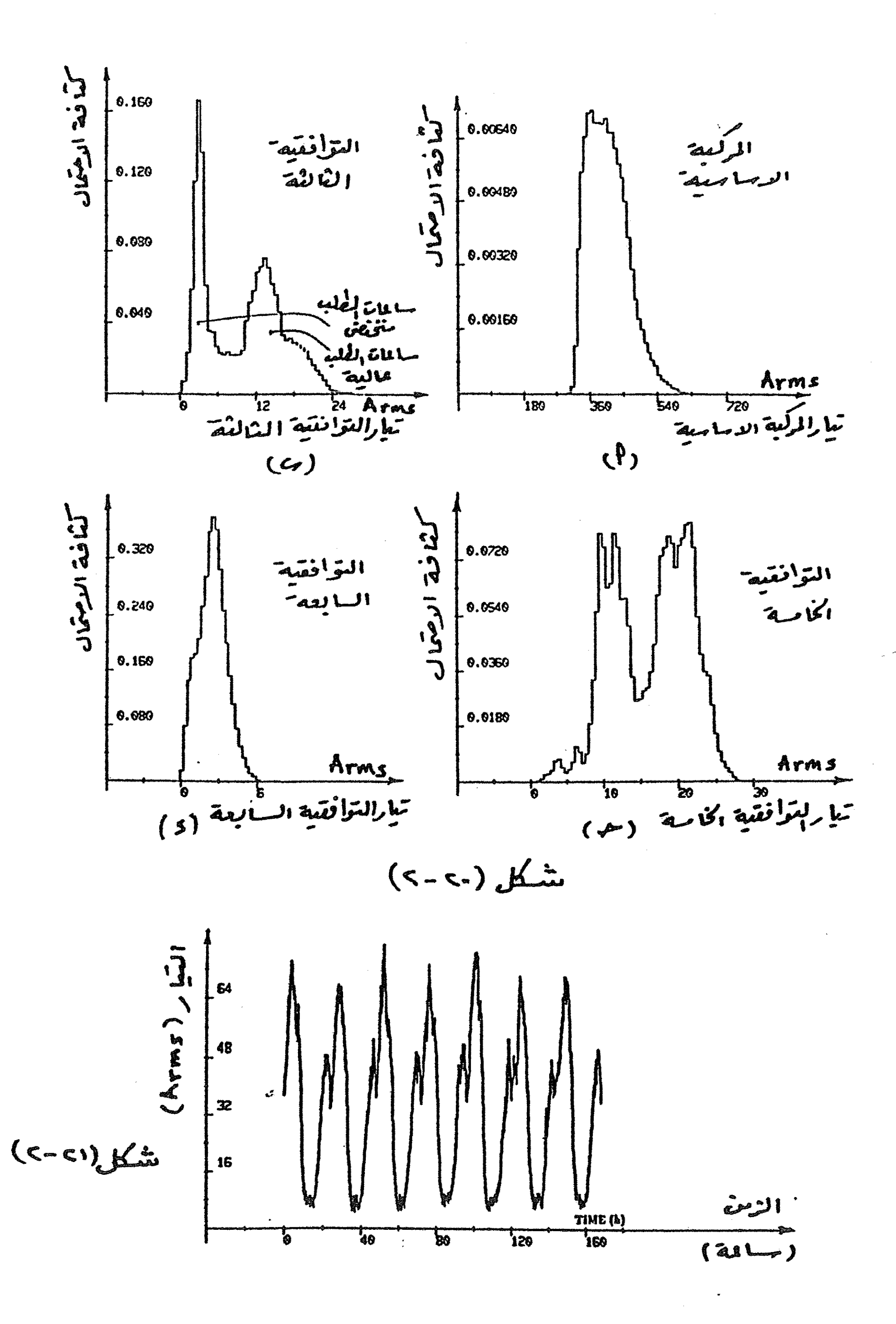
تتم الاضاءة بمصابيح التفريغ بواسطة الشحنات الكهربائية المتولدة فى الغاز أو فى البخار المخلخل ، وتخضع مصابيح التفريغ لخاصية غير خطية تؤدى إلى احتواء التيار على التوافقية الثالثة .



شكل (١٨-٢)

(حـ) (ب) (أ)

شكل (١٩-٢)



شكل (٢٠-٢)

شكل (٢١-٢)

فى شبكات التوزيع ـ ثلاثية الأوجه ـ اربعة اسلاك التى تغذى مصابيح التفريغ ، تظهر التوافقيات الثلاثية الفردية *(triplens harmonics)* فى مسار التعادل وتكون التوافقية الثالثة هى الغالبة .

ويوضح شكل (٢٢-٢) توصيل مصابيح فلورسنت ـ على الثلاثة أوجه لاجراء اختبارات التوافقيات ، وقد وجد الآتى :

- ان الجهد بين طرفى أنبوبة المصباح له خاصية غير خطية .

- يحتوى التيار المار بمسار التعادل على مركبة التوافقية الثالثة (يمكن أن يصل الى ٩٠٪ من قيمة التيار الاساسى) .

ولتحسين معامل القدرة للدائرة بشكل (٢٢-٢) تم توصيل ٣ مكثفات *(c)* وممانعة متغيـرة *(L)* وقد تؤدى هذه الدائرة الى الاقتراب من حالة الرنين عند التوافقية الثالثة . ولقد تم تسجيل العلاقات الآتية ، كما فى شكل (٢٣-٢) :

- تيار التوافقية الثالثة كنسبة من التيار الاساسى المار بمسار التعادل فى حالة توصيل المفتاح *S* (المنحنى رقم ١) .

- تيار التوافقية الثالثة كنسبة من التيار الاساسى المار بمسار التعادل فى حالة فتح المفتاح *S* (المنحنى رقم ٢) .

- توزيع الجهد كنسبة مئوية *(Voltage distribution %)* فى حالة توصيـل المفتـاح *S* (المنحنى رقم ٣) .

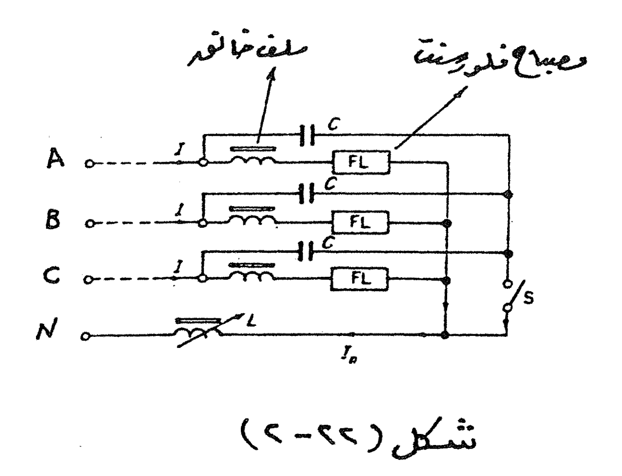
- توزيع الجهد كنسبة مئوية فى حالة فتح المفتاح *S* (المنحنى رقم ٤) .

وقد سجلت هذه العلاقات باعتبار الاحداثى السينى *(abscissa)* هو جهد التوافقية الثالثة (عند تردد يساوى ١٥٠ هرتز) .

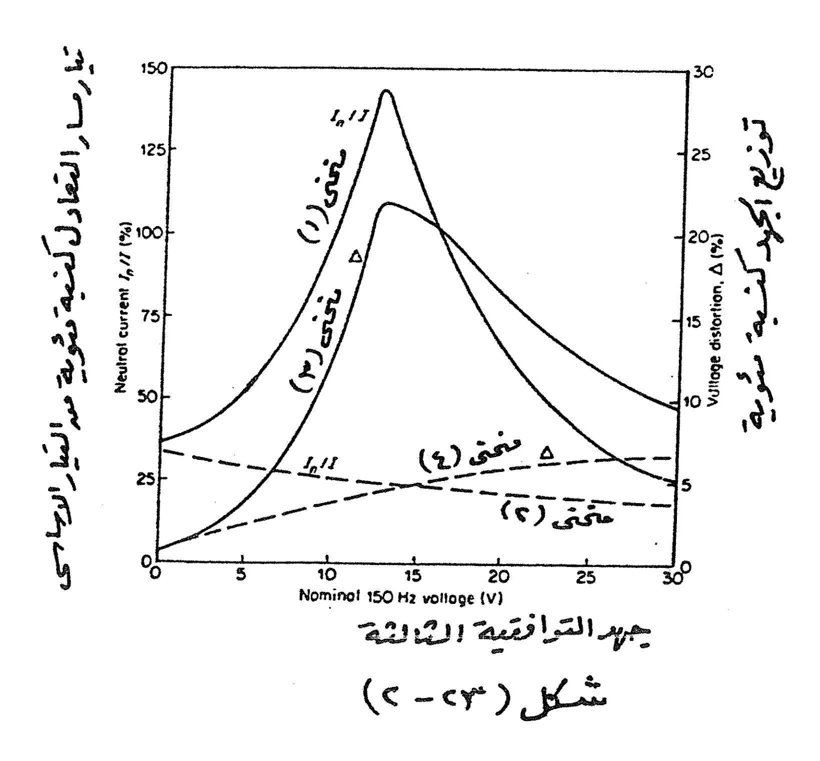
تم الاختبار لمبانى تحتوى على مجموعة مصابيح فلورسنت قدرتها ٩٠٠ ك.ف.أ عند الحمل الكلى للتشغيل والتى كانت أعلى من نقطة الرنين *(resonant)* .

وقد وجدت بعض قيم تيارات مسار التعادل عند نصف الحمل ، تتعدى قيم تيارات الاوجه ، وقد وجد أيضاً أن جهد التوزيع عند بعض لوحات التوزيع يرتفع بنسبة ٢٠ ٪ .

وللتغلب على حالة الرنين يفضل استخدام مصفوفة مكثفات *(capacitor bank)* عند لوحة التوزيع عن استخدام مكثفات موزعة على مصابيح الفلورسنت .



شكل (٢٢-٢)



شكل (٢٣-٢)

٧ - وسائل النقل الكهربائى *(Electric Traction)*

توسعت استخدامات وسائل النقل الكهربى *(electric traction)* فى الثلاثين سنة الماضية توسعاً كبيراً جداً ومن المتوقع ان يزداد استخدامها بالوصول للقرن العشرين وتعمل قاطرة الجر بالسكك الحديدية باحد المصدرين التالين :

أ - باستخدام التيار المستمر *(d.c)* من مصدر ثلاثى الاوجه من خلال الموحدات .

ب - باستخدام مصدر احادى الوجه متردد *(a.c)* .

تحتاج وسائل النقل الكهربى لتيار كبير متغير ، ويوضح شكل (٢٤-٢) العلاقة بين التيار والزمن ، ويلاحظ التغير الكبير الواضح فى التيار .

وعادة تستعمل موحدات باستخدام الديودات *(Diode rectifiers)* أو مبدلات باستخدام الثيريزتور *(Thyristor converters)* لوحدات قدرة وسائل النقل وذلك لتغذية محركات التيار المستمر *(DC motors)* . وحيث ان الديودات والثيريزتورات تحدث توافقيات تؤدى الى تشوه مصدر التغذية الرئيسية للشبكة المغذية لوسائل النقل الكهربى بالاضافة الى ان التغذية بمصدر احادى الوجه من شبكة ثلاثية الاوجه تؤدى الى عدم اتزان الجهد ، هذان العاملان (التوافقيات فى التيار وعدم اتزن الجهد) يؤديان الى زيادة مركبات التتابعية السالبة للتيارات *(Negative - phase -sequance currents)* .

وعادة تغذى وسائل النقل الكهربى من مصدر ثنائى الوجه *(two phases)* لمصدر جهد عالى كالآتى :

أ - محولات موصلة بطريقة سكوت *Scott - connected Transformers*

تستخدم هذه الطريقة للحصول على مصدر ثنائى الوجه ، والتى يتم تغذيتها من مصدر ثلاثى الاوجه ، حيث يتم استخدام محولين احادى الوجه لهما نفس القدرة ومتصلين كما فى شكل (٢٥-٢) أ ، ويوضح شكل (٢٥-٢) ب الرسم المرحلى *(Phasor diagram)* لهذه التوصيلة .

ب - محول "ليبلنك" *Le Blanc-Transformer*

يستخدم محول ثلاثى الاوجه موصل كما فى شكل (٢٦-٢) أ للحصول على مصدر ثنائى الوجه ، وتكون العلاقة بين ملفات الجهد المنخفض كالتالى :

$a_1 = c_1 = 0.577\ p.u$

$a_2 = c_2 = b_1 = b_2 = 0.333\ p.u$

ويوضح شكل (٢٦-٢) ب الرسم الخطى لهذ التوصيلة .

يمكن الحصول على قيم ودرجات التوافقيات بالتيار بسهولة من منحنى الحمل ويلاحظ عملياً أن جذر متوسط المربعات *(rms)* لتشوه جهد المصدر المغذى لوسائل النقل الكهربى يكون فى حدود ٢ - ٢,٥ ٪ . وحيث ان وسائل النقل تغذى من مصدر ثنائى الوجه فان التوافقيات الثلاثية الفردية *(Triple harmonics)* لاتلغى كما فى حالة الاحمال المتزنة ثلاثية الاوجه .

ونتيجة الاحمال المتغيرة عند نقط التغذية المقسمة لتغذية وسائل النقل (أى نقط شبكة التوزيع الخاصة بوسائل النقل) ، فان عدم اتزان الاحمال الناتج يؤدى الى زيادة مركبة التتابعية السالبة للتيارات والتى بدورها تدور فى شبكة الجهد العالى . ومن إحدى الطرق الناجحة للحصول على اتزان الاحمال استخدام طريقة التوصيل الموضحة بشكل (٢٧-٢) ، حيث تغذى وسائل النقل الكهربى من مصدر ثنائى الوجه ، وتعرف توصيلة الدلتا المحتوية على المحاثة *(inductive)* والمكثفين بدائرة الموازن *(Balancer)* والتى يجب ان يراعى فيها الا توصل المحاثة على نفس الوجهين المغذين لوسائل النقل الكهربى .

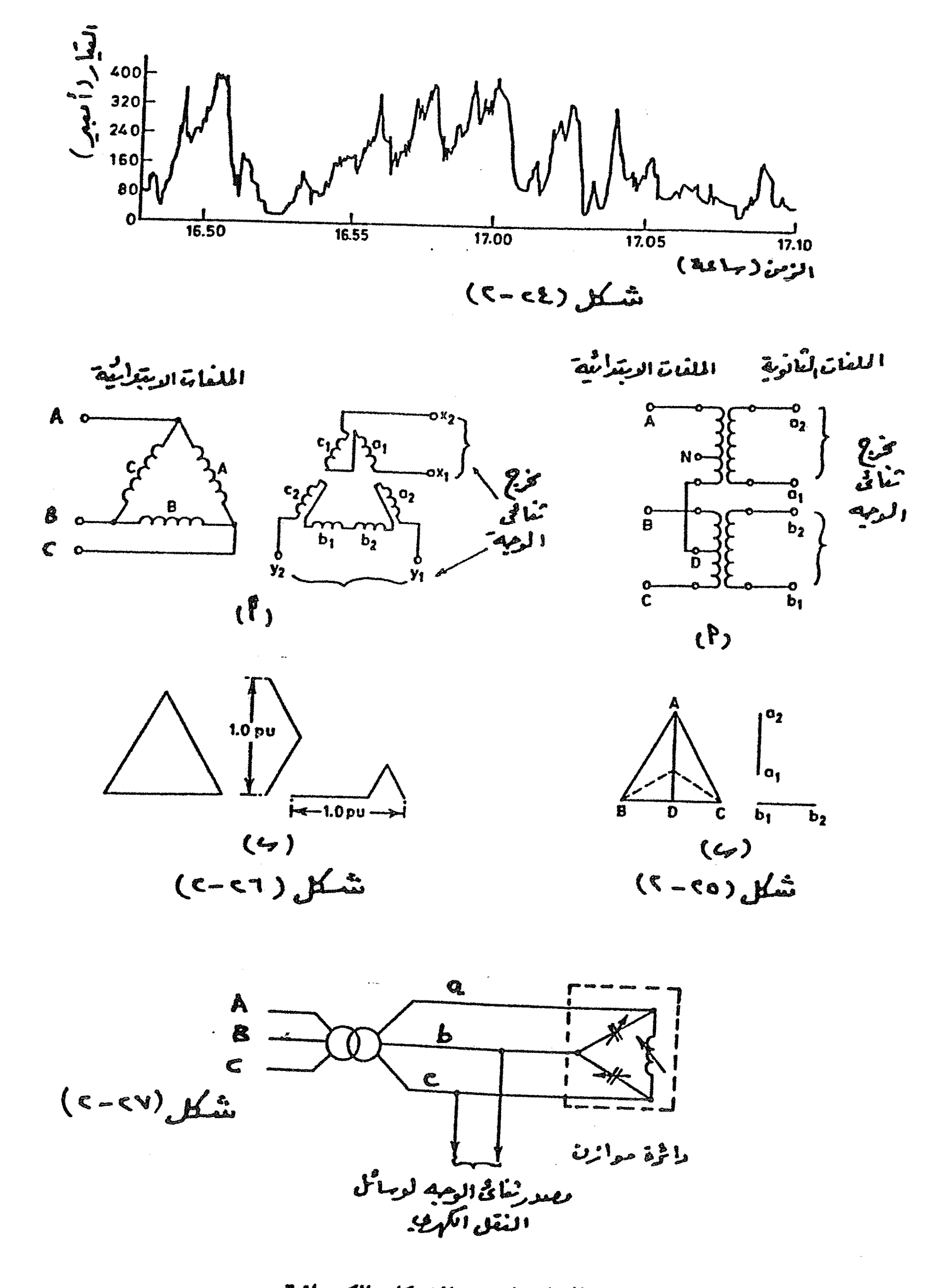
٨ - السخانات التأثيرية *Induction heaters*

تستخدم السخانات الكهربائية بالتأثير فى كثير من الصناعات مثل التعدين وتشكيل وصهر المعادن ـ والتجفيف ـ والتكرير ....

فمثلاً عند صهر المعادن بافران التسخين تنتج تيارات دائرية فى المعدن ، ونتيجة تبادل المجالات المغناطيسية الحادثة من التيار المار بملف التسخين والتيارات الدائرية فى المعدن الساخن تتولد التوافقيات وتختلف قيمتها حسب قدرة السخان .

٩ - اللحام الكهربى *Electric welding*

يوجد اللحام الكهربى بانواع مختلفة مثل اللحام بالقوس ، لحام المقاومة ويستخدم اللحام بالورش الصغيرة وبالمصانع الكبيرة مثل مصانع السيارات ومصانع متن السفن


التيار (أمبير)
400
320
240
160
80
0
16.50
16.55
17.00
17.05
17.10
الزمن (ساعة)
شكل (٢٤-٢)
الملفات الابتدائية
الملفات الثانوية
A
B
C
N
D
a_1
a_2
b_1
b_2
مخرج ثنائي الوجه
(أ)
x_1
x_2
y_1
y_2
c_1
c_2
(ب)
1.0 pu
شكل (٢٦-٢)
شكل (٢٥-٢)
a
b
c
دائرة موازن
مصدر ثنائي الوجه لوسائل النقل الكهربي
شكل (٢٧-٢)

ويحتاج اللحام الكهربى الى تيار مرتفع اما مستمرا او مترددا حسب نوع الماكينة ويكون التيار غير متزن ومحتوياً على توافقيات .

وفيما يلى نجد مثالاً مأخوذاً من مجلة *IEEE, Vol.8, No.1, January 1993* والمثال عبارة عن مصنع أنابيب ملحومة *(Welded pipes plant)* حيث يستخدم ماكينات اللحام بالمقاومة *(Resistance welding machines)* ويعمل المصنع بنظام ثلاثة ورادى - على ان يقف خط الانتاج خلال العطلة الاسبوعية كما يحتوى المصنع على وحدة تعمل بالثيرزتورات *(Thyristorized)* وأخرى تعمل بمحركات تيار مستمر *(d.c motors)* ومحركات متزامنة *(Synchronous motors)* وقد تم تسجيل القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة لمدة سبعة ايام لاحد الاوجه بشكل (٢٨-٢) ووجد الآتى :

- أقصى قدرة فعالة ٤٨٠ ك.و
- القيمة المتوسطة للقدرة الفعالة ٢٠٠ ك.و.
- أقل قدرة فعالة ١٠٠ ك.و
- القيمة المتوسطة للقدرة غير الفعالة ٩٠ ك.ف.أ.ر

تم تحليل موجة الجهد (ڤولت) وسجلت بجدول رقم (٧-٢)

جدول(٧-٢)

درجة التوافقية	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٢٦٧	٢٧٩	٣٢٠
٣	-	١,١	٢,٥
٥	-	١,٢	٥,٣
٧	-	٠,٥	٤,٧
٩	-	٠,٢	١,٦
THD %	-	٠,٦٣	٢,٤

وكذلك تم تحليل تيار الحمل (أمبير) خلال ايام التشغيل وفى أجازة نهاية الاسبوع وسجلت بجدول رقم (٨-٢)

جدول (٨-٢)

درجة التوافقية	ايام التشغيل			اجازة نهاية الاسبوع		
	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	اقصى قيمة	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	اقصى قيمة
١	١٦٠	٢٨٠	٦٠٠	٢٥	٢٨	٤٠
٣	٢	٦	٢٣	١,٥	١,٨	٦
٥	٢	١٠	٤٥	٠,٢	٠,٣	١
٧	٣,٨	٥,٨	٢١	٠,١	٠,١٥	١
٩	٠,٧	٠,٩	١٣	٠,١	٠,١٥	٠,٤
TDH%	٣	٤,٧	٩,٤	٦,١	١٢	١٥,٥

ويلاحظ أن القيم الحادثة فى أجازة نهاية الاسبوع ترجع الى الاضاءة بالفلورسنت . كذلك يلاحظ ارتفاع قيمة تيار التوافقية الخامسة للتيار خلال أيام التشغيل .

١٠ - مبنى الاعمال المحاسبية *Accounting Operations Building*

تعتبر مبانى مكاتب المحاسبة من مصادر توافقيات التيار العالية وخاصة التوافقيتين الثالثة والخامسة وبأخذ المثال المذكور فى مجلة *IEEE No. 1. Jan. 1993* نجد أن خصائص الاحمال كالآتى :

- أقصى قيمة للحمل : ٤٥٠ ك.ف.أ ، معامل القدرة = ٠,٩ (متأخراً)
- ادنى قيمة للحمل : ٢٠٠ ك.ف.أ ، معامل القدرة = ٠,٩٥ (متأخراً)
- وردية واحدة ذات احمال خفيفة فى عطلة الاسبوع

وقد تم قياس توافقيات الجهد ووجدت كما فى جدول رقم (٩-٢)

وتكون طبيعة أحمال هذه المبانى عبارة عن معدات مكتبية الكترونية (أى تحتوى على الكترونيات القوى) *(Electronic officer equipment)* والتى تكون مصدراً كبيراً لتوافقيات التيار ، ويوضخ شكل (٢٩-٢) تيار التوافقيات مسجلاً بطريقة الرسم البيانى النسيجى ، كما يوضح جدول (١٠-٢) حدود تيار التوافقيات للمبنى

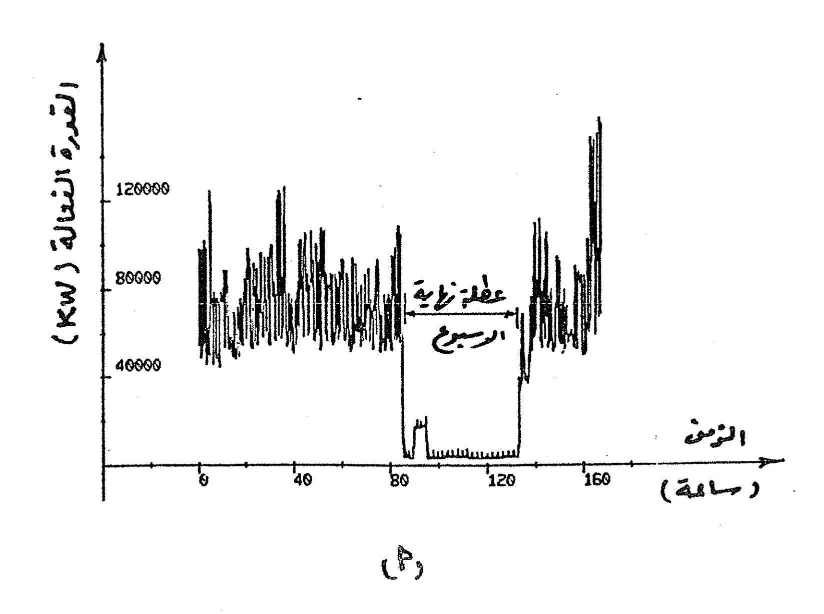
ويلاحظ من جدول (١٠-٢) أن قيمة تيار التوافقية الثالثة ٣٨ ، بينما قيمة تيار التوافقية الخامسة ٤٥ وهما اكبر قيمتين لتيارات التوافقيات

جدول (٩-٢) مستويات توافقيات الجهد *(Vrms)*

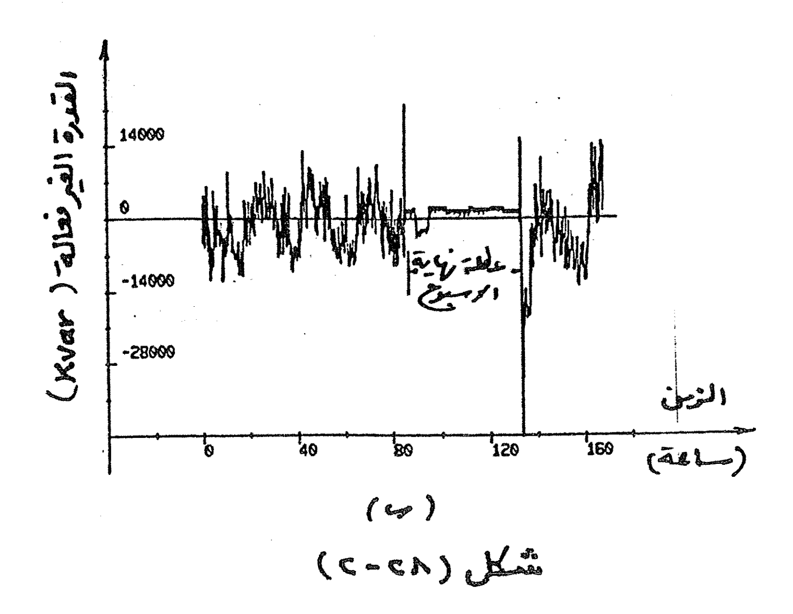
درجة التوافقية	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٢٦٨	٢٧٦,٥	٢٨٥
٣	٠,١	٠,٨٥	٣,٣
٥	٠,١	٣,٨	٦
٧	٠,٢	١,٧	٣,٨
٩	–	٠,٦	١,٥
THD %	٠,٢٢	١,٥٦	٢,٨٤

جدول (١٠-٢) تيار التوافقيات (A_{rms})

درجة التوافقية	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٢٠٥	٣٠٠	٦٠٠
٣	١٣	٢٣	٣٨
٥	٣٣	٣٩	٤٥
٧	٤	٧,٢	٩,٥
٩	٠,١	١,٢	٣,٦
١١	١,٨	٤	٦,٥
THD %	١٧,٥	١٥,٥	١٠,١

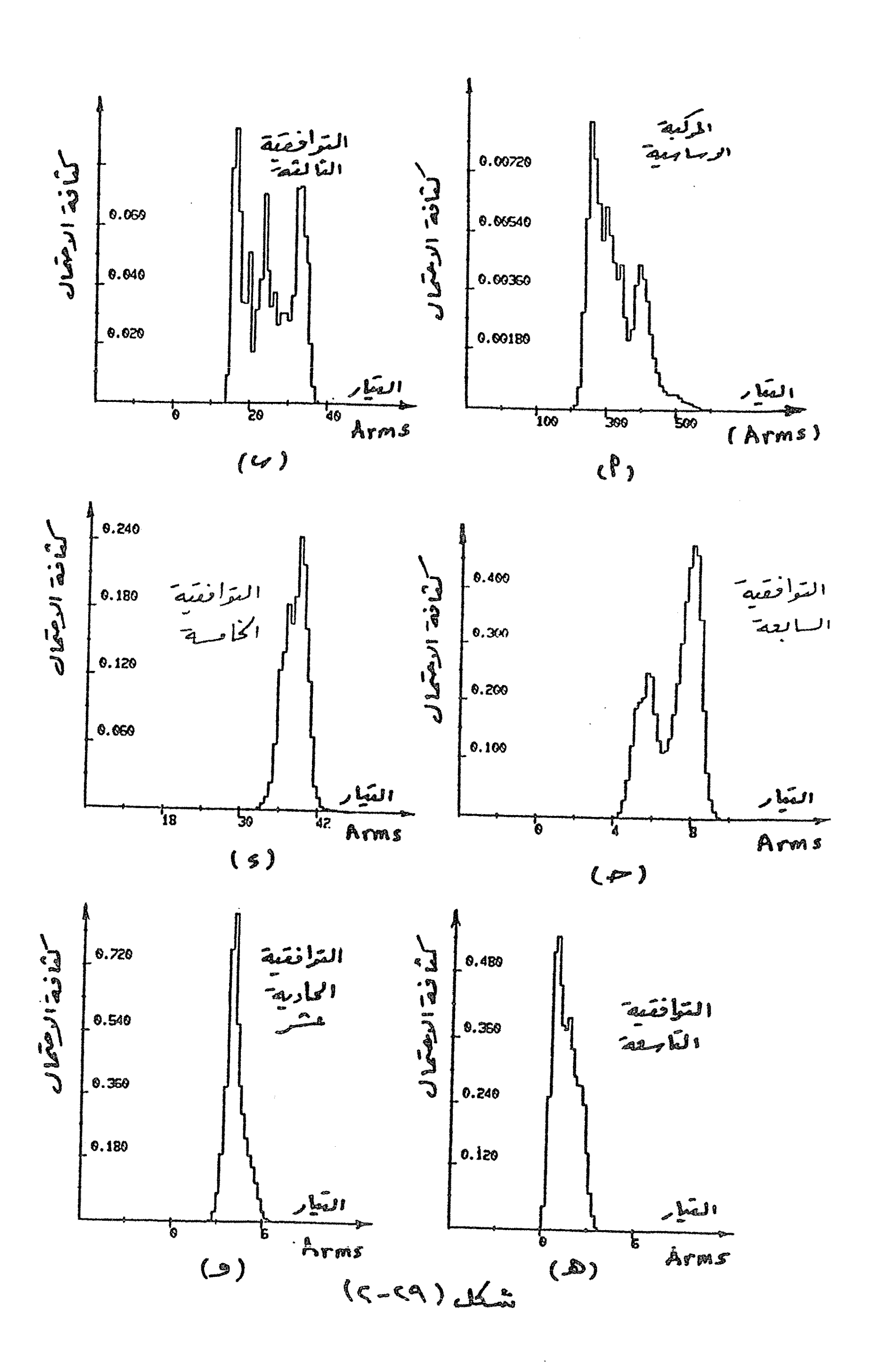

القدرة الفعالة (KW)
120000
80000
40000
عطلة نهاية الاسبوع
الزمن
0
40
80
120
160
(ساعة)

(أ)


القدرة الغير فعالة (Kvar)
14000
0
-14000
-28000
عطلة نهاية الاسبوع
الزمن
0
40
80
120
160
(ساعة)

(ب)

شكل (٢٨-٢)


المركبة الاساسية
كثافة الاحتمال
0.00720
0.00540
0.00360
0.00180
التيار
100
300
500
(Arms)
(أ)
التوافقية الثالثة
كثافة الاحتمال
0.060
0.040
0.020
التيار
0
20
40
Arms
(ب)
التوافقية السابعة
كثافة الاحتمال
0.400
0.300
0.200
0.100
التيار
0
4
8
Arms
(جـ)
التوافقية الخامسة
كثافة الاحتمال
0.240
0.180
0.120
0.060
التيار
18
30
42
Arms
(د)
التوافقية التاسعة
كثافة الاحتمال
0.480
0.360
0.240
0.120
التيار
0
6
Arms
(هـ)
التوافقية الحادية عشر
كثافة الاحتمال
0.720
0.540
0.360
0.180
التيار
0
6
Arms
(و)

شكل (٩-٢٩)

١١ - مبدلات القدرة الاستاتيكية *(The static power Convertors)*

فى هذا الجزء سنتعرض لشرح تيارات وجهود التوافقيات الناتجة من المبدلات *(convertors)* ، والتى من خلالها يتم تحويل التيار المتردد *(a.c)* الى تيار مستمر *(d.c)* ومن العاكسات *(invertors)* والتــى تحــول التيــار المستمر *(d.c)* الى تيار متردد *(a.c)* وذلك باستخدام الموحدات *(rectifiers)* والثيريزتورات *(Thyristors)* .

ونحتاج فى العادة إلى استخدام المبدلات والعاكسات ذات التيارات العالية للحصول على السرعات المتغيرة بالمحركات *(a.c)* ، *(d.c)* والتى لها استخدامات كثيرة بالصناعة وبوسائل النقل الكهربى وبمعنى آخر ان المحركات ذات اجهزة التحكم الالكترونية تكون مصدراً للتوافقيات وتشوه الموجات .

ويوضح شكل (٣٠-٢) أ تمثيلاً مبسطاً للتحكم فى سرعة محرك *(d.c)* بينما يوضح شكل (٣٠-٢) ب التحكم فى سرعة محرك *(a.c)* من خلال مبدل *(a.c/d.c)* ومرشح وعاكس *(d.c/a.c)* .

ويوضح شكل (٣١-٢) مثالاً آخر للتحكم فى محركات تيار مستمر لتشغيل الدرافيل *(d.c mill motors)* باستخدام الثيريزتورات ، حيث يكون مخرجها تيار مستمر يمكن التحكم فيه عن طريق اشارة الاطلاق *(Triggering)* لبوابة الثيريزتور .

ويعد استخدام المبدلات المحكومة *(Controlled)* وغير المحكومة *(non-controlled)* فى مصانع التحليل بالكهرباء *(electrolysis plants)* من مصادر التوافقيات ايضاً ، كذلك المبدلات المحكومة المستخدمة فى المرشحات الكهروستاتيكية .

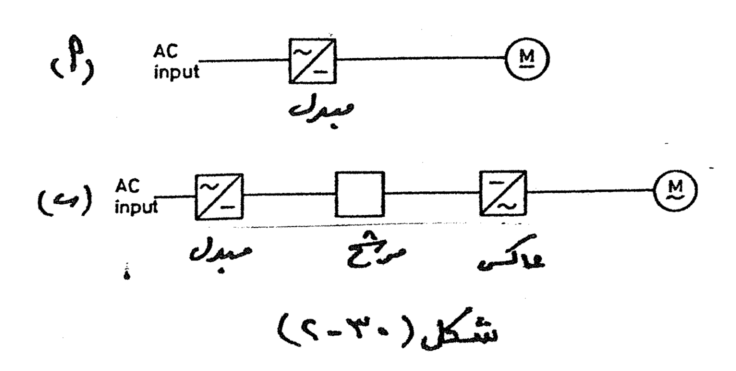
ويوضح شكل (٣٢-٢) موجة تيار احد انواع المبدلات ، ويلاحظ أنها غنية بالتشوهــات .

ولقد وجد ان المصادر الرئيسية حاليا لتيارات التوافقيات هى المبدلات والعاكسات .

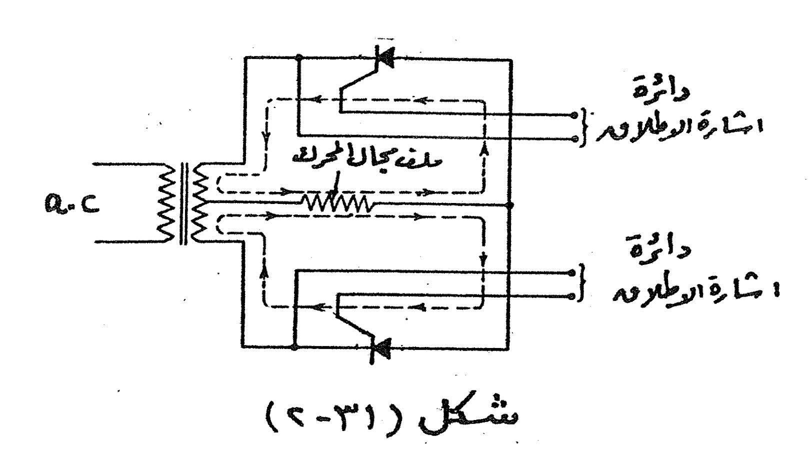
وقد يلزم معرفة بعض البيانات الاساسية لامكانية اشتقاق تيارات التوافقيات الناتجة من مبدلات القدرة الاستاتيكية . ومن هذه البيانات :

١ - العناصر المكونة لدائرة المبدل .

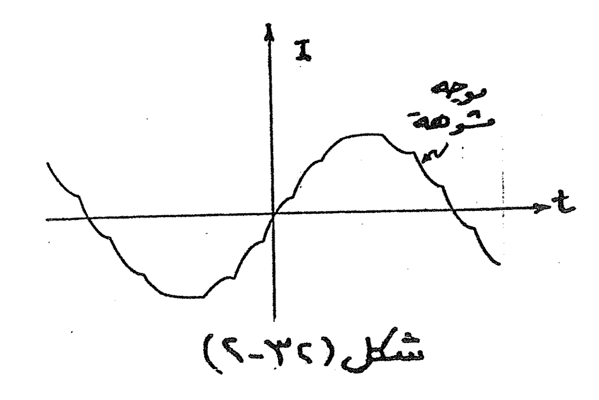
٢ - موجات الجهد المتردد *(a.c)* لمدخل المبدل



شكل (٣٠-٢)



شكل (٣١-٢)



شكل (٣٢-٢)

٣ - نوع التحكم المستخدم .

٤ - معاوقة النظام (a.c system impedance)

٥ - عناصر دائرة التيار المستمر (d.c circuit parameters) .

تستخدم المبدلات الاستاتيكية والموحدات لتحويل التيار المتردد (a.c) الى تيار مستمر (d.c) . ويحتوى جدول (١١-٢) على انواع مختلفة من المبدلات صناعة المانية .

وتكون العناصر المكونة للمبدلات والموحدات هى :

- الديودات(Diodes)
- الثيريزتورات (Thyristors)
- موحدات القوس الزئبقى (Mercury - arc rectifiers)
- مبدلات دوارة (Rotary Convertors)
- مجموعة مولد / محرك (Motor - generator sets) .

جدول (١١-٢)

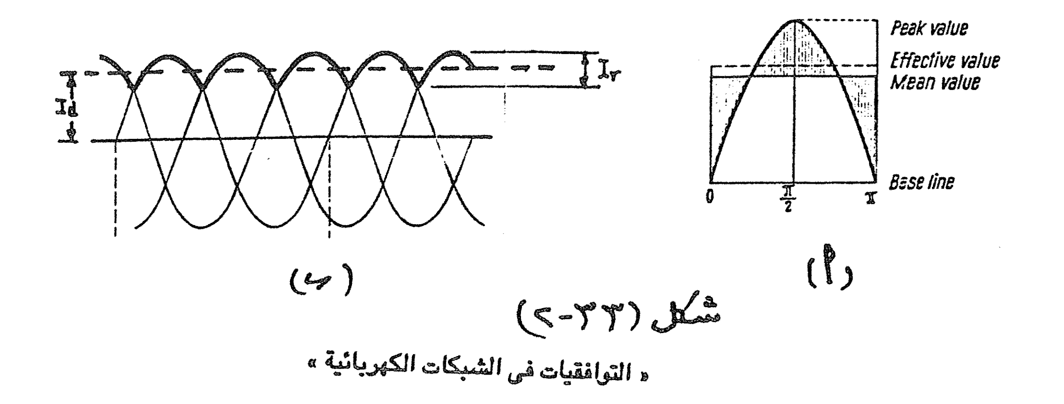
مبدل ذو تفريغ عالي : يحتوي على كاثود تسخين بشبكة أو بدون للجهد حتى ١٠٠ ك.ف واكثر والتيار حتى ١ أمبير.	
مبدل زئبقي مفرغ أنبوبي من الزجاج أو المعدن يحتوي على زئبق بشبكة أو بدون شبكة. المبدل لجهود حتى ١٥ ك.ف والتيار أقل من ٢٠ أمبير.	
مبدل زئبقي مفرغ / خزان كبير في الأنواع الكبيرة يحتاج إلى مضخة تفريغ، مياه تبريد - يحتوي على ١٢، ١٨، ٢٤ آنود وشبكات تحكم. التيار : ٣٠٠٠ : ٨٠٠٠ أ الجهد : ٥٠٠ : ٣٠٠٠ ف	
مبدل زئبقي مفرغ / اثارة مستمرة بدون مضخة تفريغ ، التبريد بواسطة الهواء أو المياه ، يحتوي على شبكة تحكم. التيار : ٣٠ - ١٠٠٠ أمبير الجهد : ٥٠٠ - ٣٠٠٠ ڤولت	
مبدل زئبقي مفرغ بقطب إشعال بدون مضخة تفريغ - التبريد بواسطة الهواء أو المياه - الإثارة غير مستمرة ويحتوي على قطب إشعال يعمل على فترات. للتيارات حتى : ١٠٠٠ أمبير الجهود حتى : ٦٠٠ ڤولت	

تابع جدول (١١ - ٢)

ديود توحيد يصمم على شكل خلية حلقية أو قرص وتكون درجة حرارة التوصيل للجرمنيوم حوالى ٦٥° وللسيليكون حتى ٢٠٠°م . ويكون الجهد العكسى لديود التوحيد السيليكونى ذو التيار القنى حتى مئات الأمبيرات يساوى ٢ ك. ف .	
الترانزستور السيليكونى أو الجرمنيوم	
الثيريزتور تكون درجة حرارة الاتصال حتى ١٢٠°م الجهد العكسى يساوى ١٥٠٠ ڤولت عند تيار مئات الأمبير .	

تابع جدول (١١-٢)

موحد على شكل ألواح أوكسيد نحاس ، طبقات ذات مقاومة عالية موضوعة بين ألواح النحاس (القطب الموجب) وألواح أوكسيد النحاس (القطب السالب) .	
موحد سلنيوم (قدرة صغيرة) طبقة رفيعة من السلينيوم على لوح معدني (القطب السالب) .	
موحد ألواح موصوصة يمكن أن تصل مساحة اللوح إلى ١٠٠ سم٢ بعض الوحدات ١٠ ك أ. عند الجهد المنخفض يحتاج إلى مياه مدفوعة للتبريد أو يغمر في الزيت .	
موحد جهد عالى ذو ألواح مرصوصة حلقية . يحتاج إلى هواء أو زيت للتبريد .	



شكل (٣٣-٢)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

من التعريفات المستخدمة فى الموحدات :

١ - **عامل الشكل** *(Form Factor)*

هو النسبة بين قيمة جذر متوسط المربعات *(rms)* الى القيمة المتوسطة *(average)* ، اى ان :

$$Form\ Factor = \frac{rms\ value}{average\ value} = \frac{effective\ value}{mean\ value}$$

يساوى عامل الشكل ١,١١ فى حالة الموجة الجيبية .

٢ - **عامل التموج** *(Ripple Factor)*

هو النسبة بين قيمة جذر متوسط المربعات *(rms)* للمركبة المترددة *(a.c)* للموجة الى قيمة التيار المستمر المتوسطة للموجة

$$Ripple\ Factor = \frac{rms\ value\ of\ the\ a.c\ component\ of\ the\ wave}{average\ d.c\ value\ of\ the\ wave}$$

$$= \frac{I_r}{I_d}$$

ويكون التيار الذى له عامل تموج منخفض اقرب الى التيار المستمر من التيار الذى له عامل تموج عالى .

٣ - **عامل الذروة للموحد** *(Redtifier Peak Factor)*

هو النسبة بين قيمة الذروة الى القيمة المتوسطة ، أى ان

$$rectifier\ Peak\ factor = \frac{Peak\ value}{mean\ value}$$

ويوضح شكل (٣٣-٢) التعبيرات المستخدمة فى هذه التعريفات .

ويوضح شكل (٣٤-٢) نوعين من الوحدات ، موحد سلنيومى *(Selenium rectifier)* وموحد ذو الواح مرصوصة *(rectifer stack)* ويتم فية توصيل الالواح على التوازى او

على التوالى او توالى وتوازى حسب قيمة القدرة والجهد المطلوبين للموحد .

ويوضح شكل (٣٥-٢) ديود سيليكونى *(Silicon Diode)* يستعمل كديود قدرة (بينما يستخدم الديود الجرمنيوم لقدرات حتى عدد قليل من الوات فقط) .

وفيما يلى بعض دوائر الموحدات المستخدمة .

أ - دائرة الموجه الكاملة باستخدام محول ذى طرف اوسط

Full - wave centre - tap circuit

يوضح شكل (٣٦-٢) مكونات الدائرة وموجتى جهد وتيار المخرج ويكون عامل التموج لهذه الدائرة يساوى ٤٨٪ بينما عامل الشكل يساوى ١,١٥ .

ب - دائرة قنطرة توحيد للموجه الكاملة *Full-wave Bridge circuit*

يوضح شكل (٣٧-٢) مكونات هذه الدائرة والتى يكون لها نفس عامل التموج وعامل الشكل وموجتى جهد وتيار المخرج كما فى الحالة السابقة .

جـ - دائرة توحيد ثلاثية الاوجه باستخدام محول دلتا / نجمة .

يوضح شكل (٣٨-٢) دائرة التوحيد ـ ثلاثية الاوجه ـ وموجة تيار المخرج ، وتيار الحمل ، ويكون لهذه الدائرة عامل تموج يساوى ١٨٪ بينما عامل الشكل يساوى ٠,٨٦ .

د - دائرة توحيد ثلاثية الاوجه باستخدام محول دلتا / نجمة وعدد ٦ ديودات :

يوضح شكل (٣٩-٢) مكونات الدائرة وشكل موجة جهد المخرج *(d.c)* .

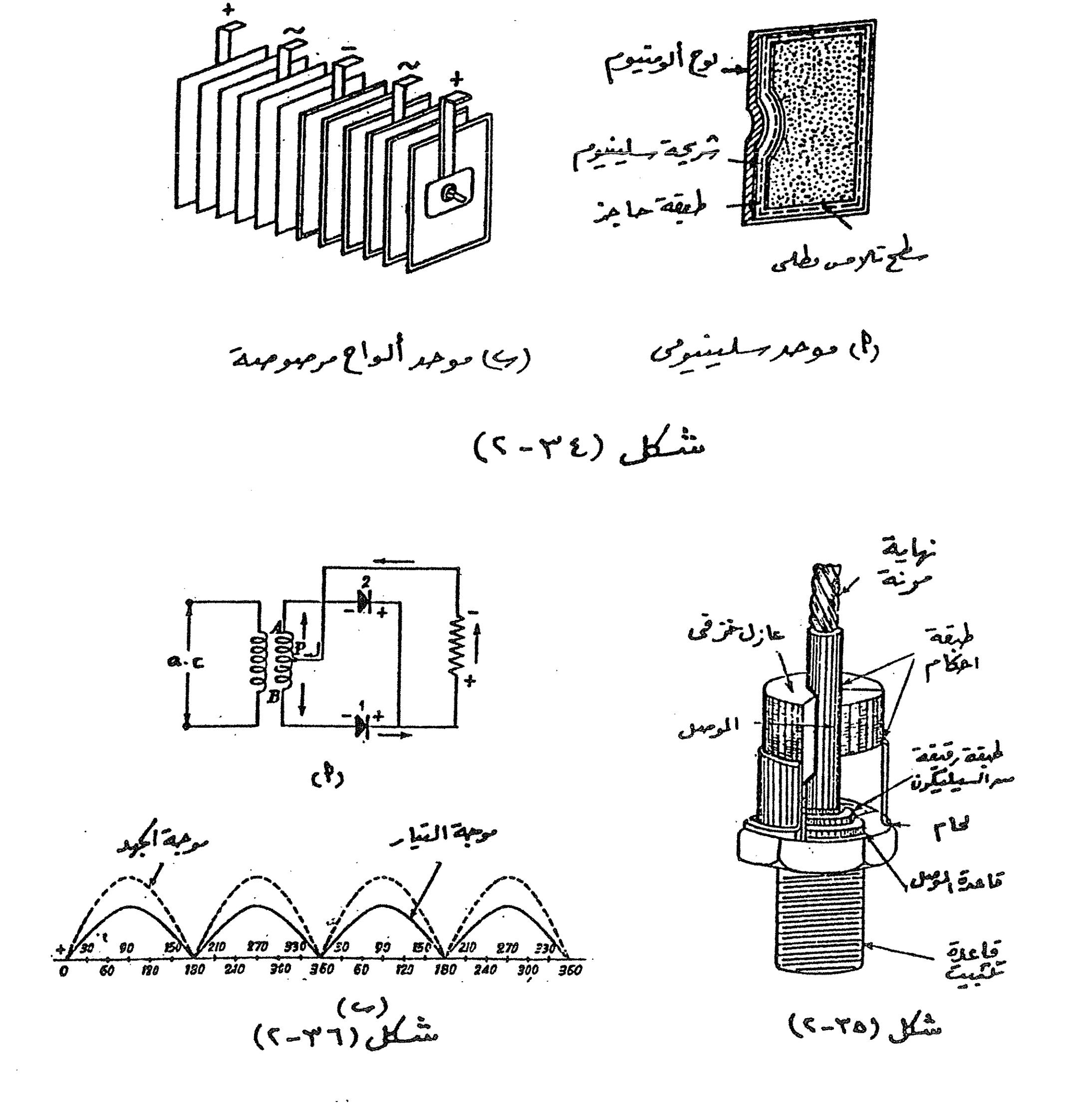
ويساوى جهد المخرج *(d.c)* ١,٣٥ مرة من قيمة جهد المدخل *(a.c)* *(rms value)*

ولهذه الحالة نجد ان عامل التموج يساوى ٤٪ وعامل الشكل يساوى ٠,٧٤ ويلاحظ فى شكل (٣٩-٢) ب ان موجة المخرج تحتوى على ٦ قيم ذروة لكل دورة من موجة المدخل ويمكن ان تكون الملفات الثانوية للمحول متصلة دلتا او نجمة .

اذا كان جهد المدخل مناسب ، فيمكن الاستغناء عن المحول .

هـ - دائرة توحيد ـ ثلاثية الاوجه ـ باستخدام توصيلتين نجمة

يوضح شكل (٤٠-٢) طريقة توصيل الدائرة ونحصل منها على موجة مخرج كما فى الحالة السابقة . ويكون لها نفس عامل التموج ايضاً وعامل الشكل .



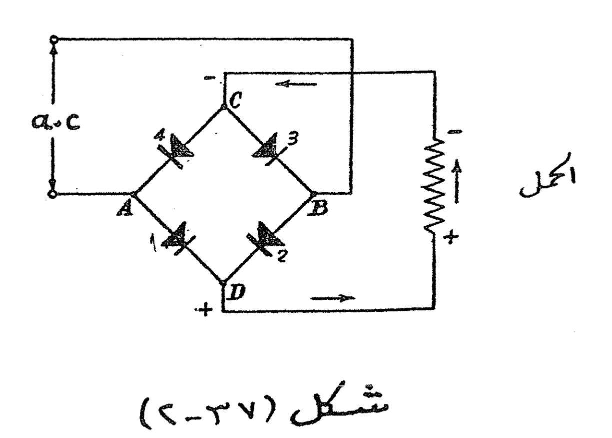
(ب) موحد ألواح مرصوصة   (أ) موحد سلينيومى

شكل (٣٤-٢)

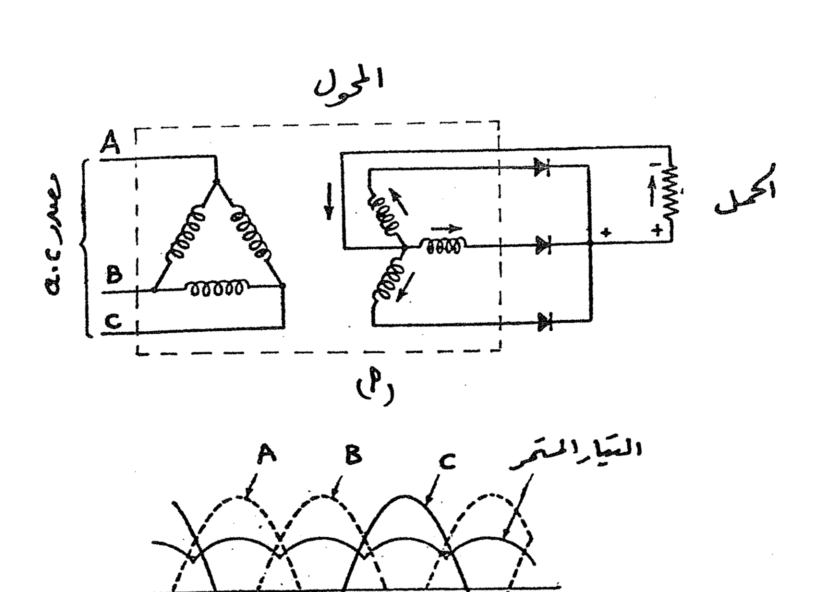
(أ)

(ب)

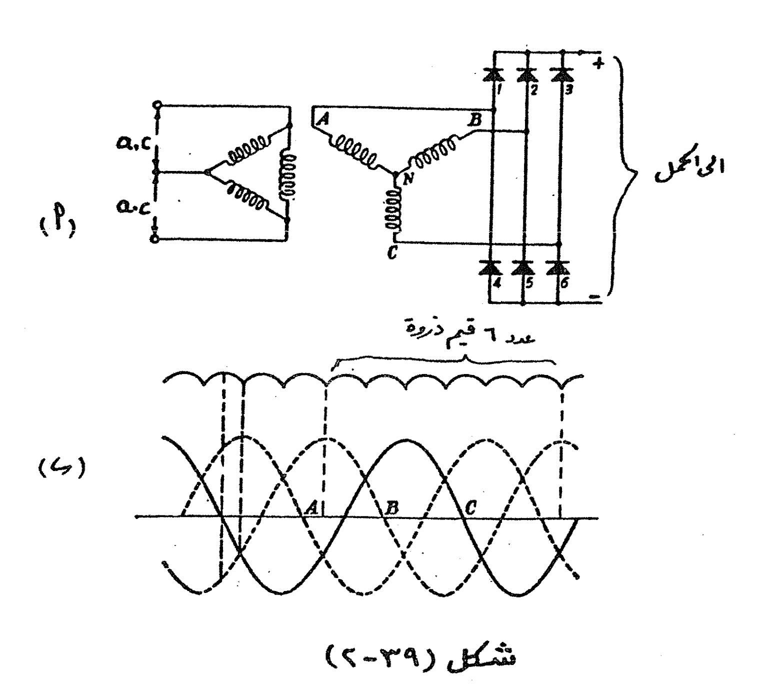
شكل (٣٦-٢)   شكل (٣٥-٢)



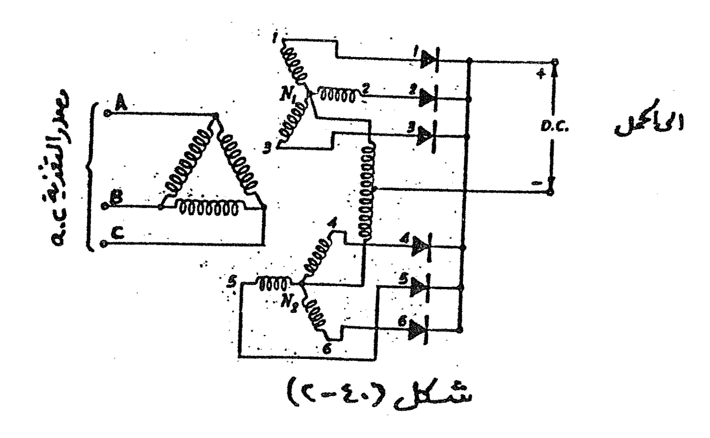
شكل (٣٧-٢)



شكل (٣٨-٢)



شكل (٣٩-٢)



شكل (٤٠-٢)

لجميع الاشكال السابقة يمكن كتابة معادلة العلاقة بين جهد المخرج *(d.c)* وجهد المدخل *(a.c)* كالآتى

$$E = KV + ND$$

حيث

E = جهد المدخل المتردد *(rms)*

K = عامل الشكل

V = جهد المخرج *(d.c)*

N = عدد الخلايا *(cells)*

D = هبوط الجهد *(voltage drop)* لكل خلية

ولدوائر قنطرة التوحيد ثلاثية الاوجه ــ واحادية الاوجه تستخدم مجموعتين من الخلايا معاً لذا يمكن اهمال الهبوط فى الجهد وتصبح المعادلة :

$$E = KV$$

$$or \quad V = \frac{E}{K}$$

اى ان جهد المخرج *d.c* يساوى جهد المدخل *(rms)* مقسوماً على عامل الشكل .

موحدات القوس الزئبقية *Mercury arc rectifiers*

يتكون الموحد ببساطة من خزان زجاجى أو معدنى مفرغ بأسفله قنينة معزولة مملوءة بالزئبق ، والذى يمثل كاثود *(Cathode)* الموحد ، اما الانود *(Anode)* فعبارة عن قطب من الحديد او الجرافيت ويوضع على مسافة من القنينة ، ويوضح شكل (٤١-٢) تمثيلاً مبسطاً لمكونات هذا الموحد وطريقة تغذيته .

عند التشغيل ، تشع الكترونات من الزئبق ، تمر من الكاثود الى الانود ، وذلك اذا كان الانود موجباً بالنسبة للكاثود. ويؤدى هذا الى مرور التيار من الكاثود الى الانود خلال الدائرة الخارجية . ولايمر التيار اذا كان الانود سالباً بالنسبة للكاثود ، كما يوجد حاجز *(baffle)* بين الانود والكاثود للتحكم فى عملية التأين ولمنع تاثر الانود بأبخرة

الزئبق..

ويوضح شكل (٤٢-٢) نوع آخر من الموحدات الزئبقية وهو موحد القوس الزئبقى من النوع محكم الغلق بلاضخ *(Pumpless sealed mercury arc retifier)*

الثيريزتور "الموحد السيليكونى المحكوم"

Thyristor (Silicon controlled rectifier)

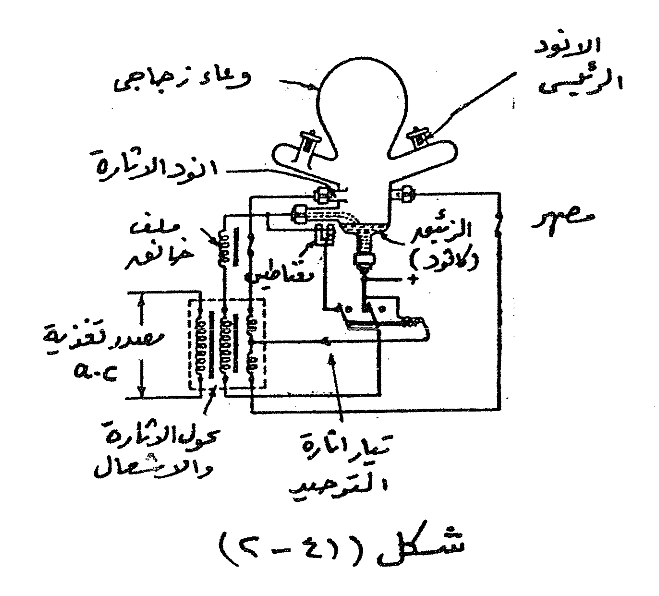
يتكون عادة من أربعة وصلات من المواد شبه الموصلة اما *pnpn* أو *npnp* وتحتوى على ثلاثة اطراف هى الانود والكاثود والبوابة ، كما فى شكل (٤٣-٢) أ بينما يوضح شكل (٤٣-٢) ب العلاقة بين التيار والجهد للثيريزتور .

ويكون الثيريزتور فى حالة توصيل *(On-state)* عند تسليط جهد تشغيل عالى بين الانود والكاثود (يكون الانود موجباً بالنسبة للكاثود) ، ويطلق على هذا الجهد بجهد الكسر *Break over voltage* او جهد الاطلاق *Triggering voltage* او جهد الاشعال *Firing* بالاضافة الى مرور تيار بوابة كبير ليقلل جهد الكسر الامامى ، وهو ما يمثله الربع الاول فى شكل (٤٣-٢) ب

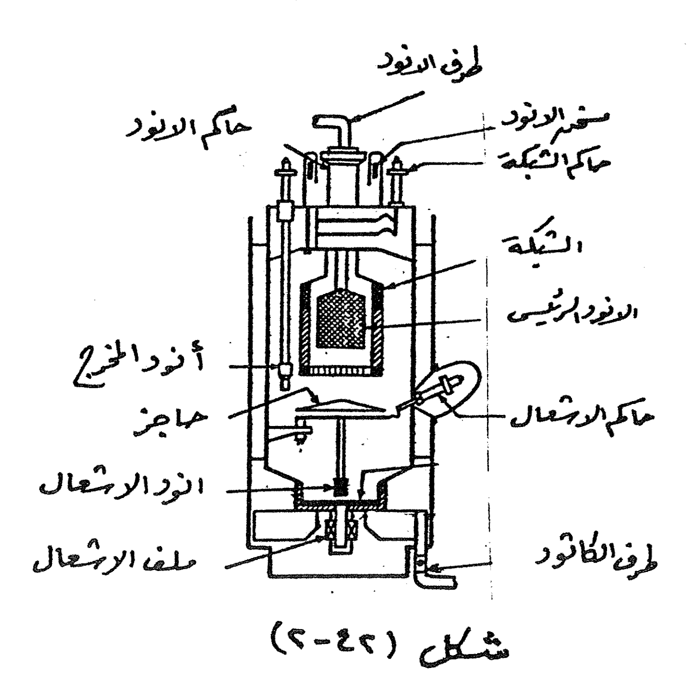
وعندما نحتاج الى فعل الثيريزتور فيجب عكس اتجاه تيار وجهد الانود حتى نصل الى قيمة الصفر مرة أخرى ويتم ذلك عن طريق تخفيض جهد الانود الى قيمة اقل من جهد الحد الادنى وتسليط تيار عكسى على البوابة .

وبذلك يتم التحكم فى نقطة جهد الكسر للثيريزتور عن طريق تيار البوابة . كما يعمل الثيريزتور كمفتاح *(switch)* عن طريق التحكم فى تيار البوابة . ففى دوائر التيار المتردد *(a.c)* يتغير وضع حالة الثيريزتور آلياً الى الفصل *(off)* كل نصف دورة عندما ينخفض الجهد الى الصفر .

ويمكن التحكم فى مخرج الثيريزتور باستخدام التحكم فى الزاوية *(phase control)* او التحكم فى توصيل الثيريزتور *(Control of conduction)* ، كما فى شكل (٤٤-٢) ويتم التحكم فى النقطة على الدورة التى يبدأ عندها توصيل الثيريزتور ، بأختيار اشارة الاطلاق (او الاشعال) عند زمن ملائم ويكون المخرج جزء من نصف الدورة فقط . كما نرى انه اذا كانت اشارة مدخل البوابة عند زاوية تساوى أو اقل من °٩٠ فان موجه المخرج تحتوى على قيمة الذروة (كما فى شكل (٤٤-٢) ب،و عادة تستخدم دائرة مكونة من ترانزستور ومكثف للحصول على اشارة الاطلاق للثيريزتور وتعرف هذه الدائرة بدائرة الاطلاق *(Trigger circuit)* .



شكل (٤١ - ٢)



شكل (٤٢ - ٢)

ويفضل استخدام الثيريزتورات على الديودات فى دوائر المبدلات وذلك لقدرة الاولى على تنظيم كامل للدائرة باعتبار ان الثيريزتور ديود يتم التحكم فيه عن طريق اشارة الاطلاق .

بالرجوع الى شكل (٣٨-٢) أ فانه يمكن رسم موجتى المدخل للتيار والجهد ، للحالة المثالية للديودات المستخدمة ،كما فى شكل (٤٥-٢) أ ويلاحظ ان موجة المخرج تحتوى على ثلاثة قيم ذروة لكل دورة من موجة المدخل . بينما يوضح شكل (٤٥-٢) ب تيارات المخرج i_0 , i_3 , i_2 , i_1 ، ويلاحظ ان التيار i_1 يظهر كنبضة مخرج نتيجة دورة كاملة للوجه A بينما يظهر التيار i_2 كنبضة خلال دورة كاملة للوجه B ، والتيار i_3 كنبضة خلال دورة كاملة للوجه C ومن هنا جاءت تسمية هذه الدائرة بدائرة موحد ذات النبض الثلاثى *(3- pulse rectifier circuit)* وعند استخدام عدد ٦ موحدات ، كما فى شكلى (٣٩-٢) ، (٤٠-٢) فان الدائرة تعرف بدائرة موحد ذات ٦ نبضات وتفضل هذه الدائرة على الاولى ذات النبض الثلاثى حيث يكون المخرج اكثر قرباً من التيار المستمر،ومن الدوائر ذات الخصائص العالية والتى تعطى مخرج تيار مستمر *(d.c)* نجد الدائرة الموضحة فى شكل (٤٦-٢) والتى تعرف بدائرة النبض الثنائى عشر *(Twelve - pulse circuit)* ، ويستخدم لهذه الدائرة محول يحتوى على ملفين ثانويين احدهما موصل دلتا والآخر موصل نجمة.

وعلى العموم تكون التوافقيات الناتجة من موحد مثالى كالآتى .

$$n = kp \pm 1$$

حيث :

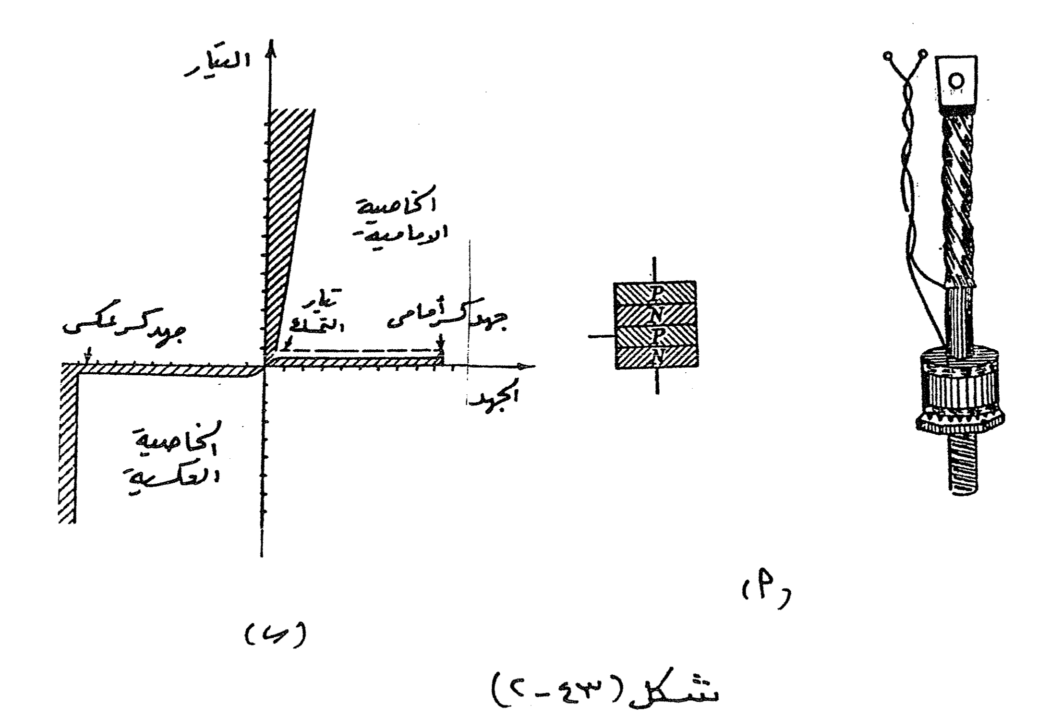
n = عدد التوافقيات

k = رقم من ١ الي ∞

p = عدد النبضات

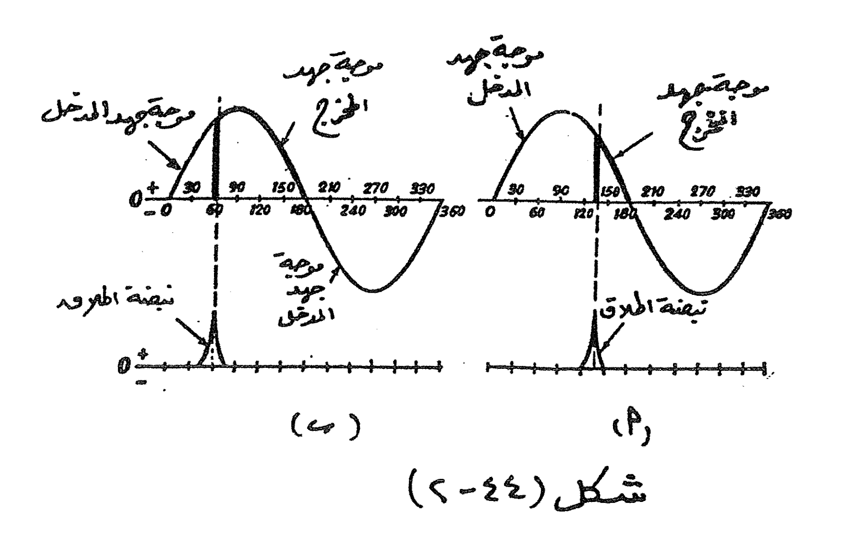
وعلى ذلك فان دائرة الموحد ذات النبض الثلاثى تنتج جميع التوافقيات ماعد التوافقيات الثلاثية الفردية *(Triplens)* .

فى الدائرة ذات ٦ نبضات ، نجد ان التوافقيات الزوجية *(even)* والثلاثية الفردية *(triplens)* لاتظهر ، وتنتج التوافقيات الخامسة ، السابعة ، الحادية عشر ، الثالثة عشر



(ب)　　　　(أ)

شكل (٤٣-٢)



(ب)　　　　(أ)

شكل (٤٤-٢)

، السابعة عشر .... ، بينما فى الدائرة ذات النبض الثنائى عشر فان التوافقيات التالية هى التى تظهر فقط:الحادية عشر ، الثالثة عشر ، الثالثة والعشرون ...

ومن ذلك نجد أنه كلما زادت عدد النبضات كلما قل ظهور التوافقيات ذات الدرجات المنخفضة .

وبناء عليه يفضل استخدام دوائر ٦ نبضات او ١٢ نبضه فى دوائر التحكم ذات الاحمال العالية ، لاحظ اشكال موجات المخرج بشكل (٤٧-٢) واعتمادها على عدد النبضات .وبالرجوع الى شكل (٤٥-٢) نلاحظ ان تيارات النبضات تكون على شكل مستطيل ، وعادة تكون قريبة من الخط المستقيم نتيجة محاثة التسريب *(leakage inductance)* .

وباستخدام تحليل "فورير" للموجة المربعة (او المستطيلة) نحصل على العلاقة

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n}$$

حيث

I_n = تيار التوافقية n

I_1 = تيار المركبة الاساسية

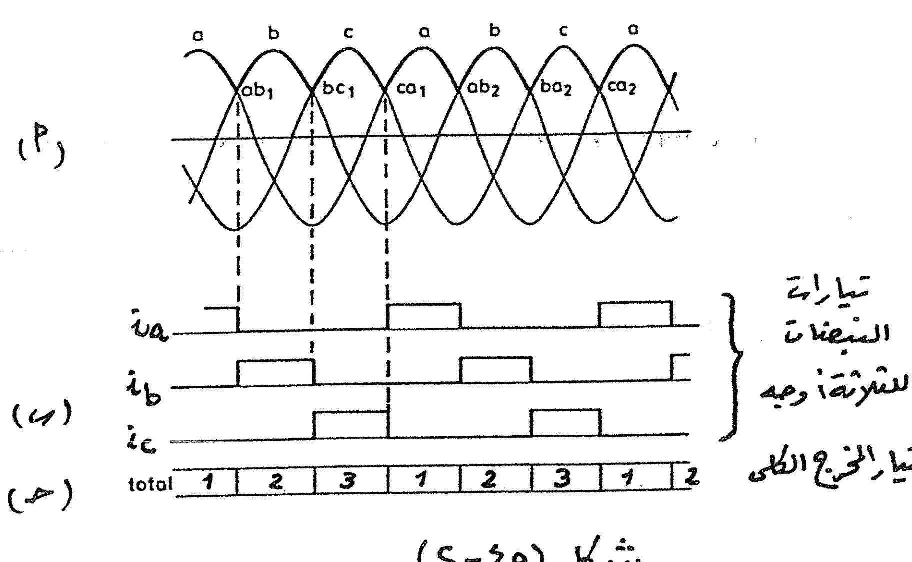
ومن المعادلة السابقة نجد ان تيار التوافقية يتناسب عكسياً مع درجة التوافقية ، بمعنى انه كلما زادت عدد النبضات كلما انخفضت قيمة تيارات التوافقيات .

كما تخضع الثيريزوترات لنفس العلاقة السابقة ، بالاضافة الى ظهور توافقيات اخرى نتيجة زوايا التأخير *(delay angles)* ، وسيتضح ذلك فيما بعد وقد أصبح شائعاً استخدام الثيريزتورات . لذا سنتعرض لها بإيضاح .

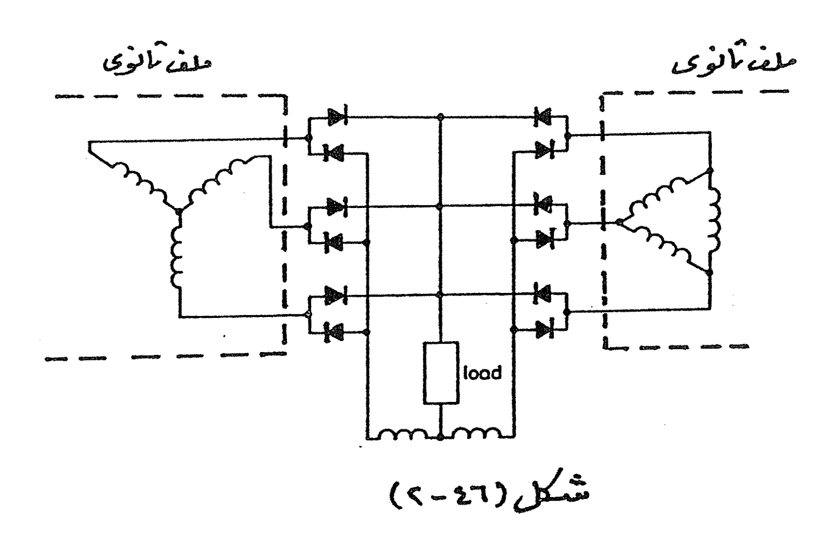
يوجد ثلاثة انواع من الموحدات والعاكسات التى يمكن التحكم فيها عن طريق زاوية الوجه *(phase angle controlled rectifier invertors)* وتصنف تبعاً لقدرتها كالآتى :

مبدلات ذات قدرات كبيرة .

مثل المستخدمة فى صناعة اختزال المعادن *(metal reduction)* ، وكذلك فى نقل القدرة باستخدام جهود التيار المستمر العالية *(High voltage d.c transmission)* .



شكل (٤٥-٢)



شكل (٤٦-٢)

p=1	p=2	p=3	p=6	p=12

شكل (٤٧-٢)
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- مبدلات ذات قدرات متوسطة

مثل المستخدمة فى صناعة اجهزة التحكم فى المحركات وكذلك فى تطبيقات وسائل النقل باستخدام الكهرباء .

- مبدلات ذات قدرات صغيرة احادية الوجه

مثل المستخدمة فى التلفزيون وشواحن البطاريات .

١ - المبدلات ذات القدرات الكبيرة *Large power convertors*

وهذه تكون قدرتها بالميجاوات (*megawatts*) ولها ممانعة ذات قيمة اكبر فى جانب (*d.c*) عنها فى جانب (*a.c*) للمبدل ويكون المبدل كمصدر لتوافقيات الجهد فى جانب (*d.c*) للمبدل ولتوافقيات التيار فى جانب (*a.c*) للمبدل . واذا كان مصدر التغذية للمبدل متماثلاً (*Symmetrical*) فان التيار الناتج يكون متساوياً فى كل الاوجه .

يوضح شكل (٤٨-٢) أ تمثيل بسيط لمبدل ذى أتجاه واحد (*one - way converter*) لعدد p من الاوجه وتكون معاوقة النظام للتيار المتردد (*a.c*) تساوى صفر (ويطلق عليها ايضاً بمعاوقة التوحيد *Commutating impedance*) ومحاثة التنعيم *smooting inductance* تساوى مالانهاية . وتتكون تيارات الاوجه ، لهذ الدائرة من نبضات مستطيلة موجبة دورية لها عرض W يساوى $2\pi / p$ ومتكررة عند تردد المصدر .

ويتحليل الموجة المربعة الموضحة بشكل (٤٨-٢) جـ والتى تخضع للمعادلة

$$f(\omega t) = f(-\omega t)$$

(وتعرف بالدالة الزوجية *even function*)، نجد ان تحليل "فورير" يعطى فقط المركبات التى تحتوى على جيوب تمام الزاوية (*cosine*) بالاضافة الى مركبة التيار المستمر كالآتى :

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-W/2}^{W/2} d(\omega t) = \frac{W}{2\pi} = \frac{1}{p} \qquad (W = \frac{2\pi}{p})$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-W/2}^{W/2} \cos(n\omega t)\, d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \sin \frac{nW}{2} = \frac{2}{n\pi} \sin \frac{\pi n}{p}$$

وعلى ذلك نحصل من تحليل "فورير" على تيار النبضات الموجبه (I_p) كالآتى :

$$I_p = \frac{2}{\pi} \left(\frac{W}{4} + \sin\frac{W}{2} \cos \omega t + \frac{1}{2} Sin \frac{2W}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3W}{2} \cos 3\omega t ...\right)$$

وباستخدام عدد p من الثيريزتورات فى مسار الرجوع ، كما فى شكل (٤٨-٢) ب فان الدائرة تعرف بمبدل ذى اتجاهين *(Two-way convertor)* والذى نحصل منه على نبضات تيار موجبة وسالبة ، وبتحليل النبضات السالبة نحصل على تيار النبضات السالبة I_N كالآتى :

$$I_N = \frac{2}{\pi} \left(-\frac{W}{4} + \sin\frac{W}{2} \cos \omega t - \frac{1}{2} \sin \frac{2W}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3W}{2} \cos 3\omega t ...\right)$$

ومنها يتضح ان التيار الناتج يكون محصلة تيارات النبضات الموجبة والسالبة اى ان

$$I = I_p + I_N = \frac{4}{\pi} \left(\sin\frac{W}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} Sin \frac{3W}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin\frac{5W}{2} \cos 5\omega t ...\right) \qquad .... (1)$$

ويتضح من هذه المعادلة إنها لاتحتوى على مركبة التيار المستمر ولا المركبات الزوجيــة .

نفرض ان عرض الموجه المربعة W تساوى π ، كما فى شكل (٤٩-٢) أ ، وبالتعويض فى المعادلة السابقة نحصل على :

$$I(t) = \frac{4}{\pi} \left(\cos (\omega t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \cos (5\omega t) - \frac{1}{7} \cos (7\omega t) + ...\right)$$

وتكون التوافقيات١ ، ٥ ، ٩ ... ناتجة من النبضات الموجبة ، اما التوافقيات ٣ ، ٧ ، ١١ ، ... فمن النبضات السالبة ويمكن تمثيل هذه التوافقيات كنسبة من التردد الاساسى *(Frequancy domain)* كما فى شكل (٤٩-٢) ب ويوضح شكل (٥٠-٢) شكل الموجة المربعة المشوهه $I(t)$ واحتوائها على التوافقيات الثالثة والخامسة .

التوافقيات فى دائرة الموحد ذات ٦ نبضات

يوضح شكل (٥١-٢) تغذية موحد ذات ٦ نبضات من خلال محول موصل نجمة / دلتا او نجمة / نجمة . وكذلك موجات جهود الاوجه بملفات التيار المستمر للمحول

(الملفات الثانوية) ، والتيار المار بالثيريزتورات، والتيار بملف التيار المستمر للوجه A ، وتيار الخط *(line current)* .

ويساوى عرض النبضه W (فى هذه الحالة) $\frac{2\pi}{3}$ وبفرض ان ارتفاع النبضة I_d وبالتعويض فى معادلة التيار رقم (١) نجد ان التيار المار بالوجه a كالآتى :

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos \omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{17}\cos 17\omega t + ...) \quad .... (2)$$

ويوضح شكل (٥٢-٢) التيارات المارة بالثلاثة اوجه أى i_a , i_b , i_c ويلاحظ الآتى من المعادلة السابقة

- لاتحتوى على التوافقيات الثلاثية الفردية (٣ ، ٩ ، ....)
- درجات التوافقيات الموجودة تتبع المعادلة $n = 6k \pm 1$
- درجات التوافقيات $(6k + 1)$ هى التوافقيات ذات الاشارات الموجبة (اى التوافقيات ١ ، ٧ ، ١٣ ، ....)
- درجات التوافقيات $(6k-1)$ هى التوافقيات ذات الاشارات السالبة (اى التوافقيات ٥ ، ١١ ، ١٧ ، ....)
- تكون قيمة المركبة الاساسية *(rms)* كالآتى

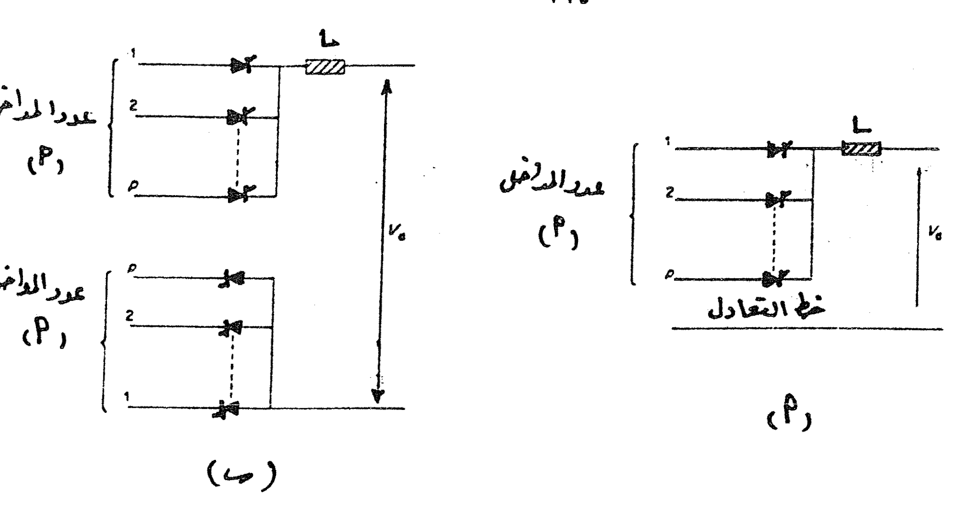
$$I_1 = (\frac{1}{\sqrt{2}})(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}) I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

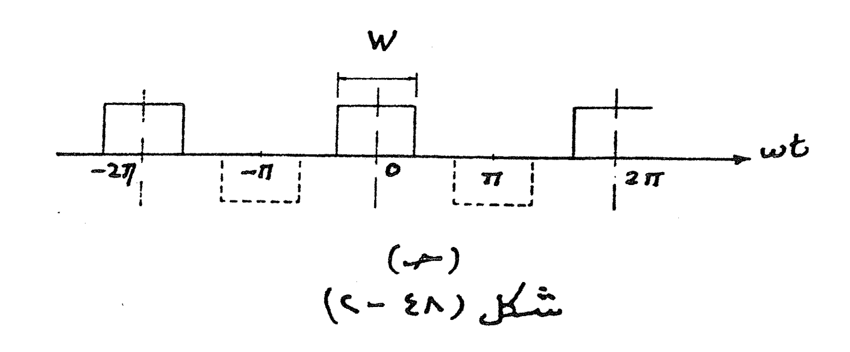
- تكون قيمة تيار التوافقيات *(rms)* للدرجة n كالآتى

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

كما ان موجات التيار i_a , i_b , i_c موجات مربعة بفرض ان معاوقة التوحيد او معاوقة النظام تساوى صفر . ولكن تتغير شكل الموجات المربعة تبعاً لعاملين هما قيمة معاوقة النظام وقيمة زاوية التأخير *(phase retard)* للثيريزتور ويوضح شكل (٥٣-٢) تأثير هذين العاملين على الموجة المربعه .

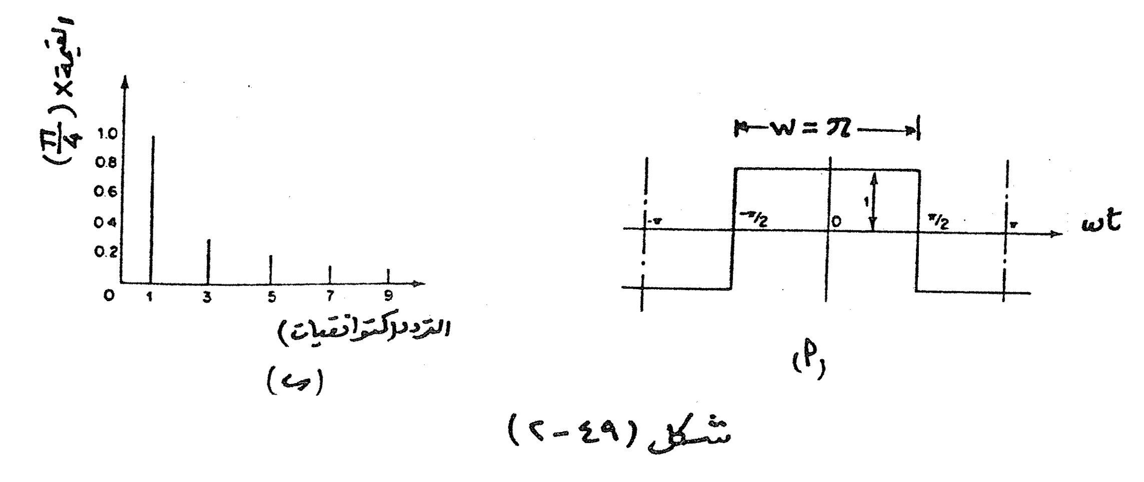
فى شكل (٥١-٢) اذا كانت احد ملفات المحول متصلة دلتا (Δ) (سواء الابتدائـــى او



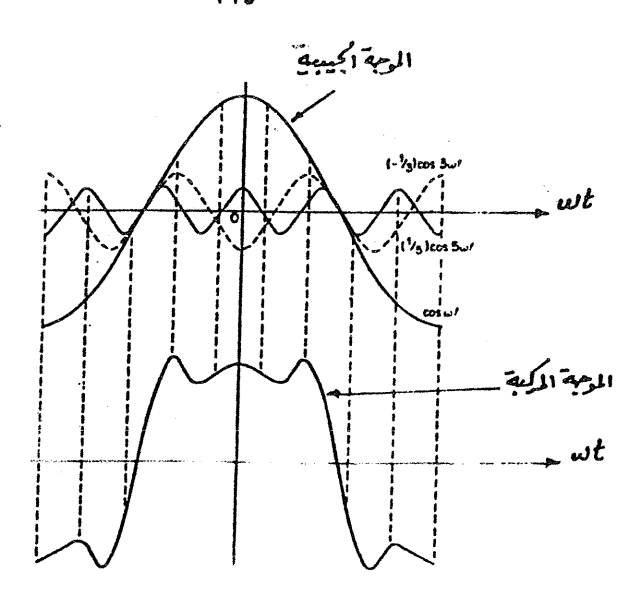


(حـ)

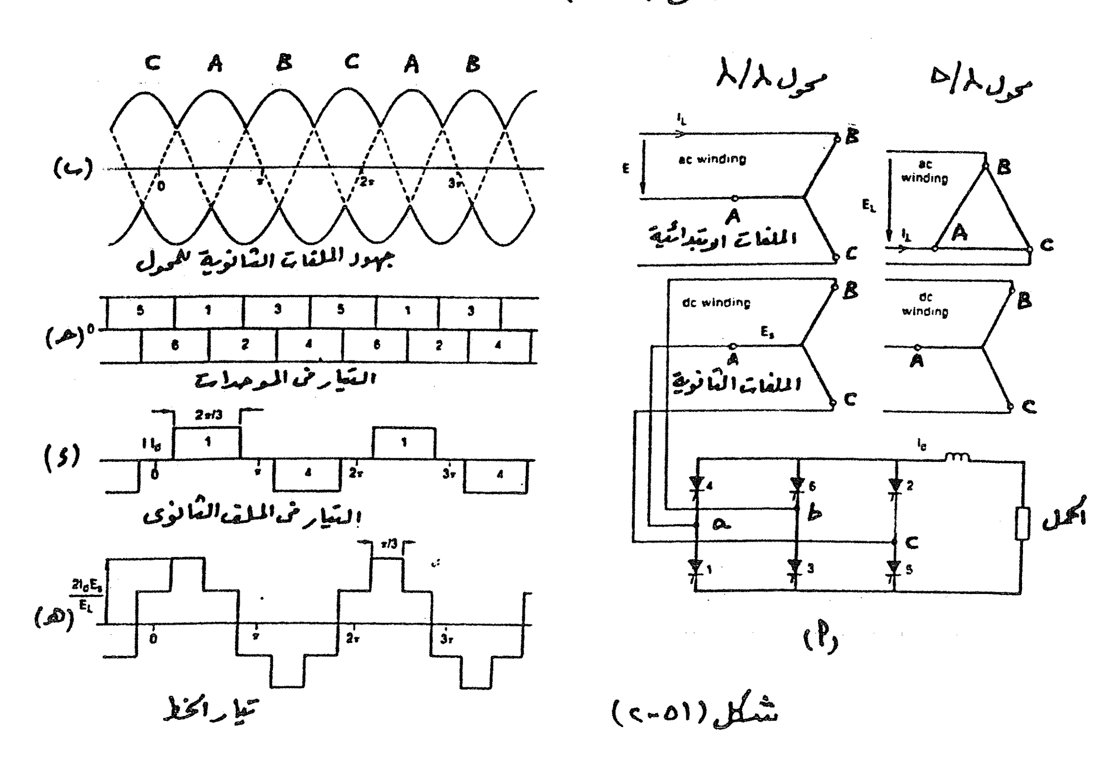
شكل (٤٨ - ٢)



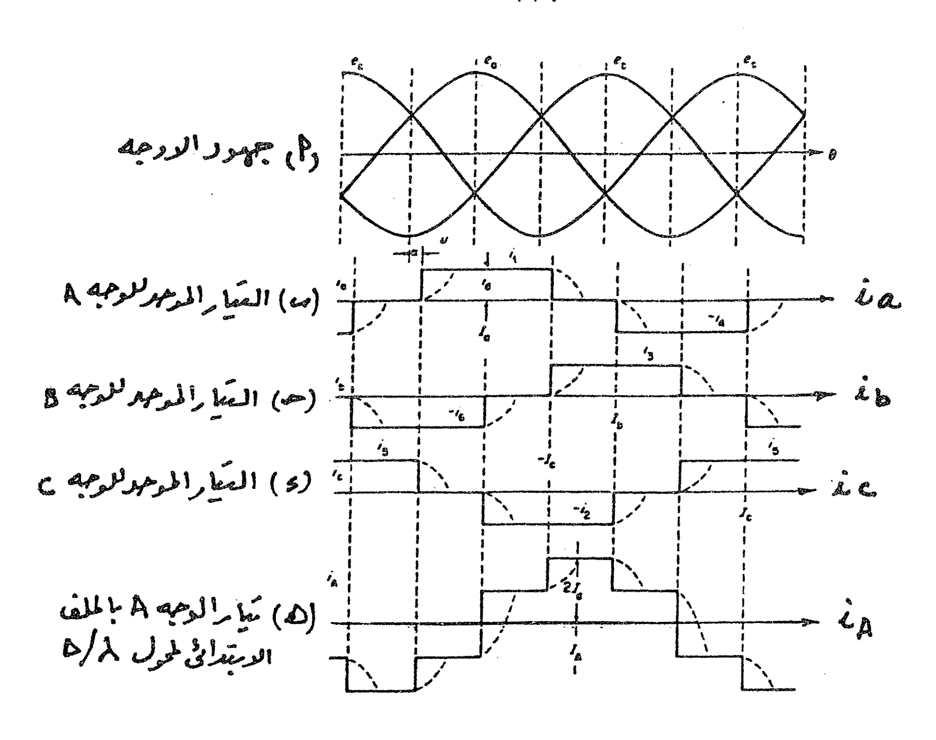
شكل (٤٩ - ٢)



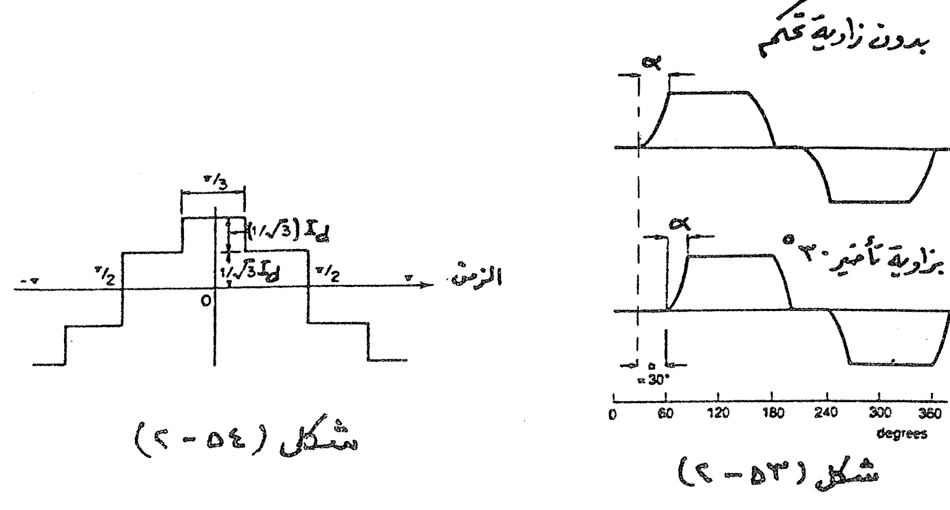
شكل (٢-٥٠)



شكل (٢-٥١)

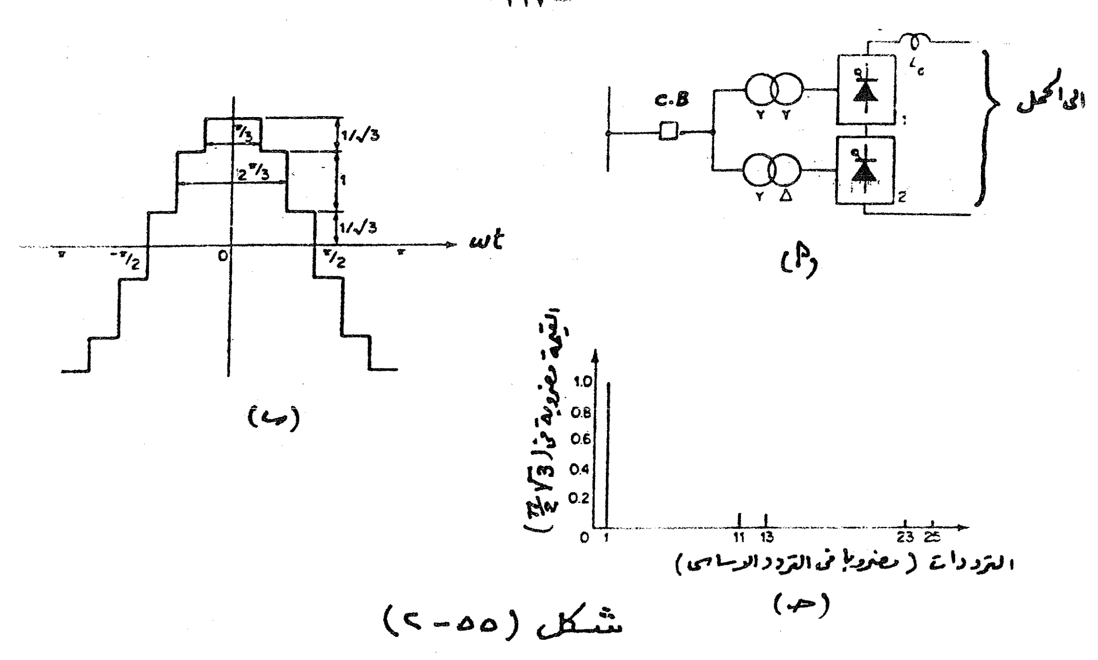


شكل (٥٢-٢)

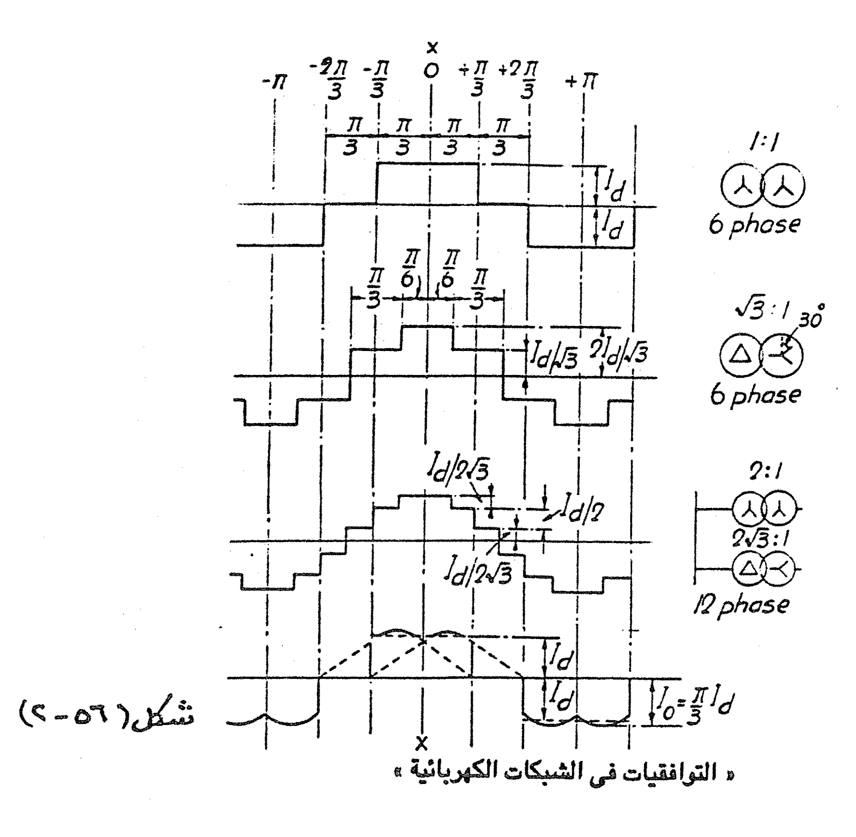


شكل (٥٤ - ٢)

شكل (٥٣ - ٢)



شكل (٥٥-٢)



شكل (٥٦-٢)

الثانوى) فان موجات التيار ، على جانب المدخل (a.c) ، تتكون من الاختلاف اللحظى بين موجتين التيار الثانوى المربع ، كما فى شكل (٢-٥٢) هـ ، وتحلل هذه الموجة باستخدام المعادلة رقم (١) وبالتعويض عن عرض النبضات $\pi/3, \pi$ لمركبتى المعادلة على التوالى .

اذا كانت المجموعة الاتجاهية للمحول نجمة / نجمة فانه يتم اضافة المعامل $\sqrt{3}$ لنسبة التحويل وتصبح موجة التيار كما فى شكل (٢-٥٤)،ويكون تحليل "فورير" لتيار الوجه A كالآتى :

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d(\cos \omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t + \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \ldots\ldots) \qquad \ldots\ldots (3)$$

تختلف مكونات هذه المعادلة (تحليل التيار i_a) عن حالة التوصيلة نجمة / نجمة عن طريق تتابع دوران درجات التوافقيات تبعاً للمعادلة $6k \pm 1$ وذلك للقيم الفردية للثابت k (اى التوافقيات الخامسة والسابعة ، والسابعة عشر والتاسعة عشر ...)

التوافقيات فى دائرة الموحد ذات ١٢ نبضة

يتم توصيل دائرة الموحد ذات ١٢ نبضة (Twelve - pulse circuit) اما كما سبق وذكرنا فى شكل (٢-٤٦) او باستخدام محولين Y/Y ، Y/Δ وتوصيل مجموعتين ٦ نبضات كما فى تمثيل الدائرة بشكل (٢-٥٥) أ ، وتكون المركبة الاساسية لجهد المحولين متساوية وبينهما زاوية ازاحة ٣٠° ، ويوضح شكل (٢-٥٥) ب موجة تيار الوجه لهذه التوصيلة ، ويظهر من شكل (٢-٥٥) جـ ان درجات التوافقيات الموجودة لهذه الدائرة هى الحادية عشر ، الثالثة عشر ، الثالثة والعشرين ، الخامسة والعشرين ، كما يجب ان تكون زاوية التحكم (control angle) لمجموعتى هذه الدائرة متساوية بالاضافة الى ان التردد الاساسى لتيار المحولين على جانب المدخل (a.c) فى اتفاق مرحلى (in pase) .

ولكى نحصل على معادلة التيار i_a ، فى هذه الحالة ، تستخدم المعادلة رقم (٢) لتوصيلة المحول نجمة / نجمة والمعادلة رقم (٣) لتوصيلة المحول دلتا / نجمة كالآتى :

$$i_a = 2(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}) I_d(\cos e\ \omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \frac{1}{25}\cos 25\omega t - \ldots\ldots) \qquad \ldots\ldots (2)$$

وتحتوى هذه المعادلة على التوافقيات $(12k \pm 1)$ ، كما فى شكل (٥٥-٢) جـ بينما تدور تيارات التوافقيات للدرجات $(6k \pm 1)$ (للقيم الفردية للثابت k) بين المحولين ولاتظهر بشبكة تغذية المصدر $(a.c)$.

ويوضح شكل (٥٦-٢) مقارنة بين موجة تيار الوجة فى حالة ٦ نبضات ، ١٢ نبضة وبتوصيلة اتجاهية مختلفة لمحولات التغذية .

توجد دوائر ذات نبضات اعلى من ١٢ كالآتى

- دائرة ذات ٢٤ نبضة

ويستخدم معها اربعة محولات ، لهم زاوية ازاحة °١٥ بين الجهود الاساسية .

- دائرة ذات ٤٨ نبضة

وتستخدم ثمانية محولات ، لهم زاوية ازاحة °٧,٥ بين الجهود الاساسية .

ويوضح جدول (١٢-٢) درجات التوافقيات تبعاً لعدد النبضات بالدوائر المختلفة

تأثير المحول ومعوقة النظام :

بفرض اخذ معاوقة النظام او معاوقة التوحيد (commutation reactance) فى الاعتبار (اى لاتساوى صفراً) فان موجة التيار تكون كما فى شكلى (٥٢-٢) ، (٥٣-٢) ، وفيما يلى استنتاج معادلة التيار . ينقسم التيار ، كما فى شكل (٥٧-٢) الى ثلاثة أجزاء هم i_p , i_q , i_r وبفرض ان معاوقة التوحيد لكل وجه تساوى X_c فان تيار التوحيد يكون :

$$i_p = \frac{E}{\sqrt{2}\, X_c} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

وتكون X_c هى ممانعة التسرب للمحول (Transformer leakage reactance) .

وفى نهاية عملية التوحيد تكون $\omega t = \gamma$ ، $i_p = I_d$ وبالتعويض فى المعادلة السابقة فان

$$i_d = \frac{E}{\sqrt{2}\, X_c} [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]$$

وبقسمة المعادلتين السابقتين نحصل على معادلة الجزء الاول من منحنى التيار فى شكل(٥٧-٢)

$$i_p = I_d \left(\frac{\cos\alpha - \cos\omega t}{\cos\alpha - \cos(\alpha+\gamma)}\right) \quad .... \quad \alpha < \omega t < (\alpha+\gamma)$$

وتكون معادلة الجزء الاوسط من منحنى التيار هى

$$i_q = I_d \quad .... \quad (\alpha+\gamma) < \omega t < \left(\frac{2\pi}{3}+\alpha\right)$$

بينما معادلة الجزء الاخير من منحنى التيار هى

$$i_r = I_d - I_d \left[\frac{\cos\alpha - \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})}{\cos\alpha - \cos(\alpha+\gamma)}\right] .. \left(\frac{3\pi}{3}+a\right) < \omega t < \left(\frac{2\pi}{3}+\alpha+\gamma\right)$$

ويلاحظ فى شكل (٥٧-٢) ان نبضة التيار السالبة مماثلة للنبضة الموجبة لذلك فان معادلة تيار التوحيد تحتوى فقط على التوافقيات الفردية غير الثلاثية وتكون تيارات التوافقيات بدلالة زاوية التراكب (overlap angle) والتى رمز لها بالرمز γ وزاوية التأخير او الاشعال (Delay or firing angle) والتى رمز لها بالرمز α وتوضح الاشكال من - (٥٨-٢) وحتى (٦٥-٢) العلاقة بين تيارات التوافقيات $I_5, I_7, I_{11}, I_{13}, I_{17}, I_{19}, I_{23}, I_{25}$ وزاوية التراكب γ عند قيم مختلفة لزاوية التأخير α .

ونلاحظ الآتى من هذه الاشكال :

١ - كلما زادت قيمة الزاوية γ كلما انخفضت قيمة تيار التوافقيات ، وتكون اسرع انخفاضاً كلما زادت درجة التوافقيات .

٢ - يزيد معدل انخفاض التوافقيات مع زيادة γ حتى حد معين .

٣ - تقل قيمة التوافقية n الى اقل قيمة عند الزاوية $\gamma = 360/n$ ثم تزيد ببطئ بعد ذلك .

٤ - عند زاوية تراكب γ ثابتة ، فان التغير فى التوافقيات عند قيم α المختلفة يكون صغيراً .

٥ - عند قيمة تيار ثابتة،وبزيادة الزاوية α فان الزاوية γ تقل مؤدية الى زيادة

التوافقيات وتكون اكبر قيمة عند γ تساوى صفر .

الخلاصة ان وجود معاوقة النظام تعمل على تقليل التوافقيات الموجودة فى موجات التيار ، ويزيد التأثير اذا كانت عمليات التوحيد غير محكومة *(uncontrolled rectification)* ، وعند زوايا الاشتعال الكبيرة فان نبضات التيار لاتتأثر بمعاوقة النظام .

التوافقيات الموجودة بمخرج المبدل

Harmonics on the d.c side of a converter

تكون درجات توافقيات الجهد لدائرة قنطرة ثلاثية الاوجه ـ ٦ نبضات ـ هى :

$$n = 6K$$

ويوضح شكل (٦٦-٢) موجات الجهد المستمر *(direct voltage)* للمبدل كالآتى .

- يوضح شكل (٦٦-٢) أ موجة الجهد عند القطب (او الطرف) الموجب
- يوضح شكل (٦٦-٢) ب موجة الجهد عند القطب (او لطرف) السالب
- يوضح شكل (٦٦-٢) جـ موجة الجهد عند طرفى المخرج .

وتكون فترة تكرار الموجة فى شكل (٦٦-٢) جـ هى $\pi/3$ ، وتخضع الموجة فى هذه الفترة للمعادلات الآتية ، باعتبار نقطة المرجع هى نقطة التقاطع الصفرى (C_1) للجهد

$$\left.\begin{aligned} V_d &= \sqrt{2}\, V_c \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 0 < \omega t < \alpha \\ V_d &= \sqrt{2}\, V_c \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{2}\, V_c \sin \omega t \\ &= \frac{\sqrt{6}}{2}\, V_c \cos \omega t \ldots\ldots\ldots \quad \alpha < \omega t < \alpha + \gamma \\ V_d &= \sqrt{2}\, V_c \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \ldots\ldots\ldots \quad \alpha + \gamma < \omega t < \frac{\pi}{3} \end{aligned}\right] \quad 3$$

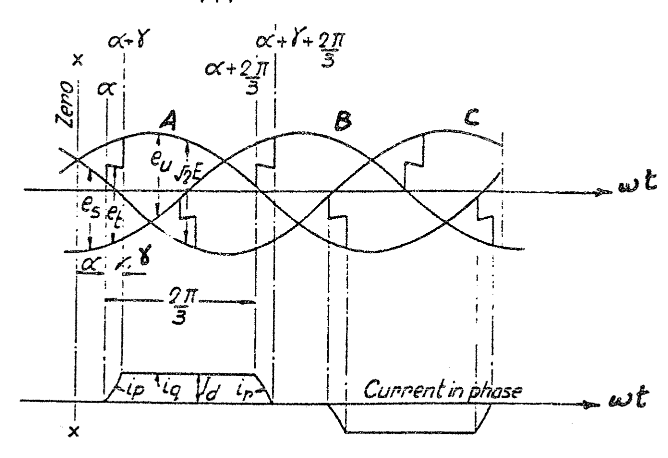
حيث Vc هى جذر متوسط مربعات *(rms)* الجهد الموحد بين وجهين .

من المعادلات السابقة يمكن الحصول على معادلة جذر متوسط المربعات *rms* لجهد التوافقيات كالآتى :

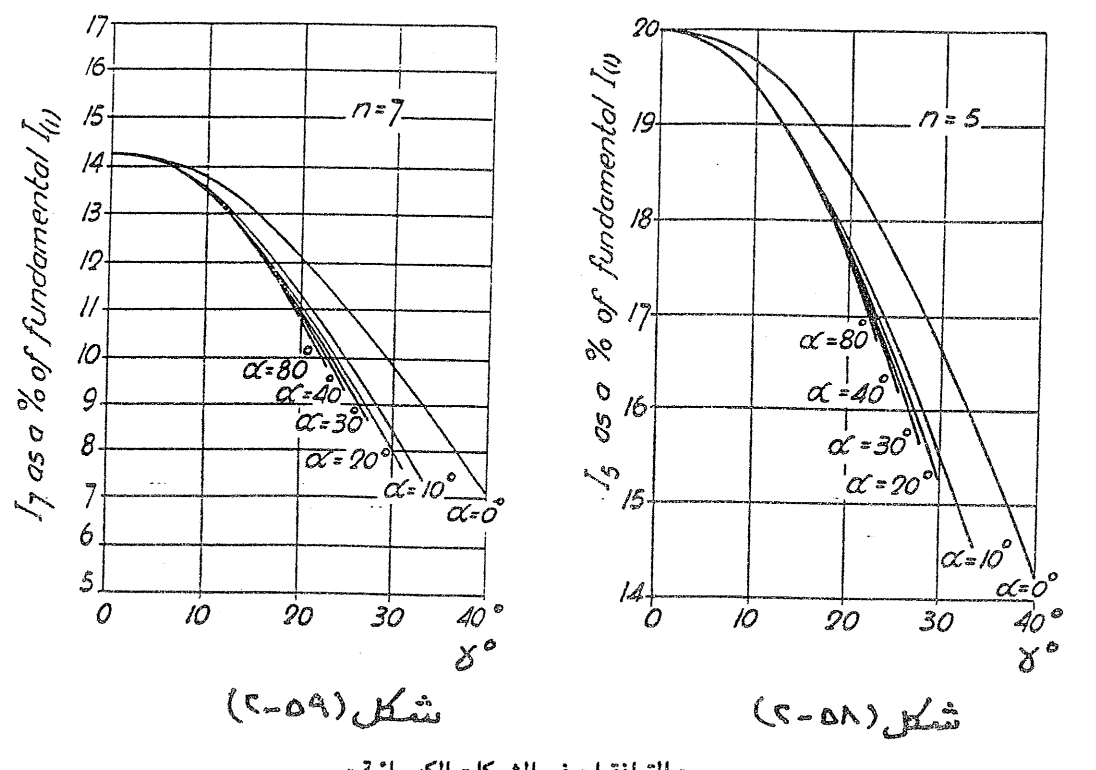
جدول (١٢-٢) درجات التوافقيات الحادثة تبعاً لعدد نبضات دائرة الموحد

(توافقيات التيار المتردد a.c)

درجات	دائرة الموحد ذات نبضات											
التوافقيات	٦	١٢	١٨	٢٤	٣٠	٣٦	٤٢	٤٨	٥٤	٦٠	٦٦	٧٢
٥	✓											
٧	✓											
١١	✓	✓										
١٣	✓	✓										
١٧	✓		✓									
١٩	✓		✓									
٢٣	✓	✓		✓								
٢٥	✓	✓		✓								
٢٩	✓				✓							
٣١	✓				✓							
٣٥	✓	✓	✓			✓						
٣٧	✓	✓	✓			✓						
٤١	✓						✓					
٤٣	✓						✓					
٤٧	✓	✓		✓				✓				
٤٩	✓	✓		✓				✓				
٥٣	✓		✓						✓			
٥٥	✓		✓						✓			
٥٩	✓	✓			✓					✓		
٦١	✓	✓			✓					✓		
٦٥	✓										✓	
٦٧	✓										✓	
٧١	✓	✓	✓	✓		✓						✓
٧٣	✓	✓	✓	✓		✓						✓

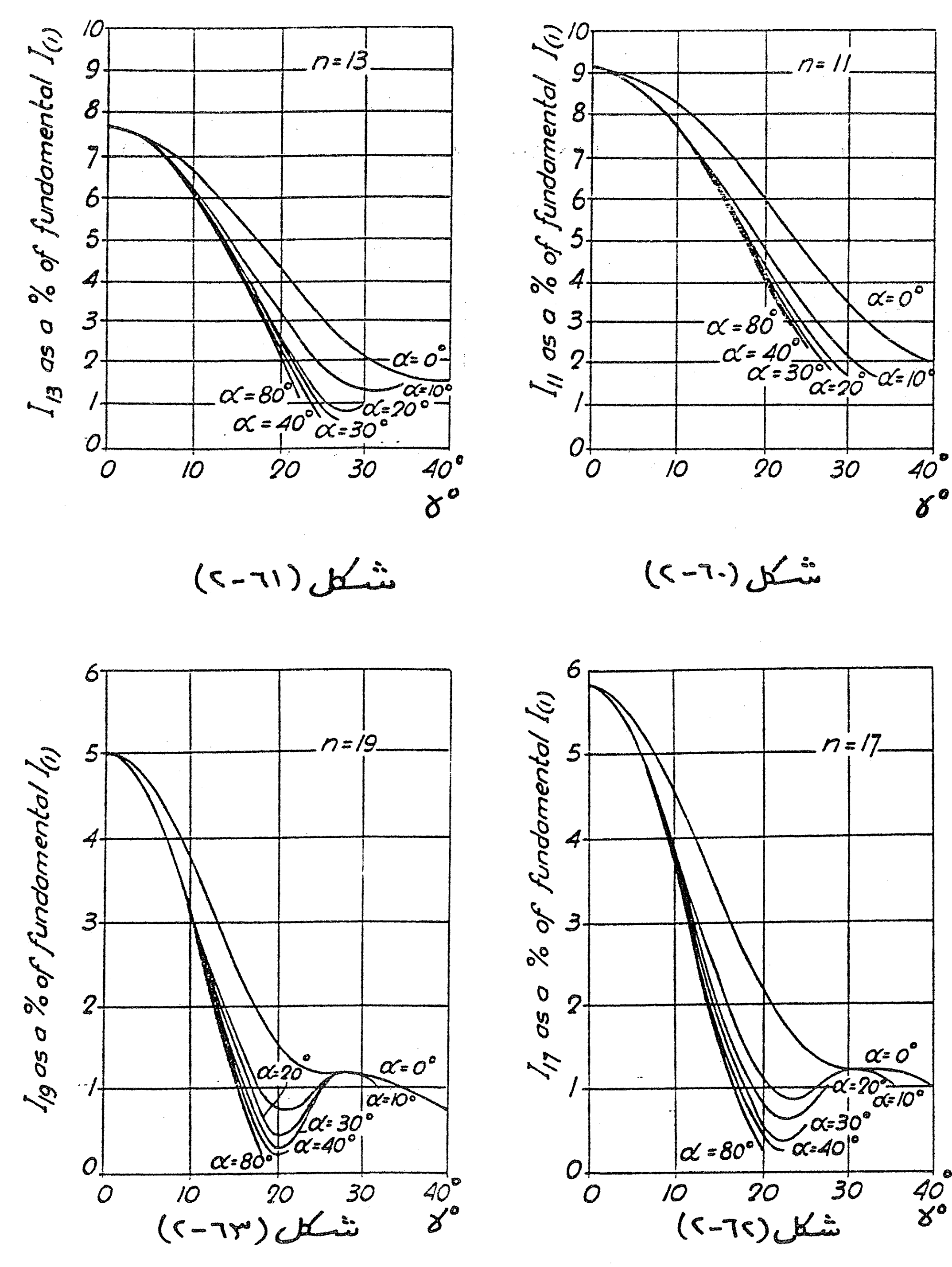


شكل (٢-٥٧)



شكل (٢-٥٩)

شكل (٢-٥٨)



شكل (٦١-٢)

شكل (٦٠-٢)

شكل (٦٣-٢)

شكل (٦٢-٢)

$$V_n = \frac{V_{co}}{\sqrt{2}\,(n^2-1)} \{(n-1)^2 \cos^2 (n+1) \frac{\gamma}{2}) + (n+1)^2 \cos^2 ((n-1) \frac{\gamma}{2})$$

$$- 2(n-1)(n+1) \cos ((n+1) \frac{\gamma}{2}) \cos ((n-1) \frac{\gamma}{2}) \cos (2\alpha + \gamma)\}^{\frac{1}{2}}$$

حيث

V_{co} هو أقصى متوسط للجهد الموحد ويساوى $\frac{3\sqrt{2}\,V_c}{\pi}$ فى حالة مبدل ٦ نبضات .

توضح الاشكال (٦٧-٢) ، (٦٨-٢) ، (٦٩-٢) العلاقة بين جهود التوافقيات السادسة والثانية عشر والثامنة عشر (كنسبة من الجهد V_{co}) وبين زاوية التراكب γ عند قيم مختلفة لزاوية التأخير (α)

عند $\gamma = 0\ , \alpha = 0$ تصبح معدلة جهد التوافقيات كالاتى :

$$V_{no} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2 -1)} V_{co}$$

او

$$\frac{V_{no}}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \simeq \frac{\sqrt{2}}{(n^2)}$$

بالتعويض عن n تساوى ٦، ١٢، ١٨ نحصل علي القيم ٤,٠٤٪ ، ٩٩,٪ ، ٤٤,٠٪ على التوالى .

عموماً كلما زادت الزاوية α زادت قيمة التوافقيات

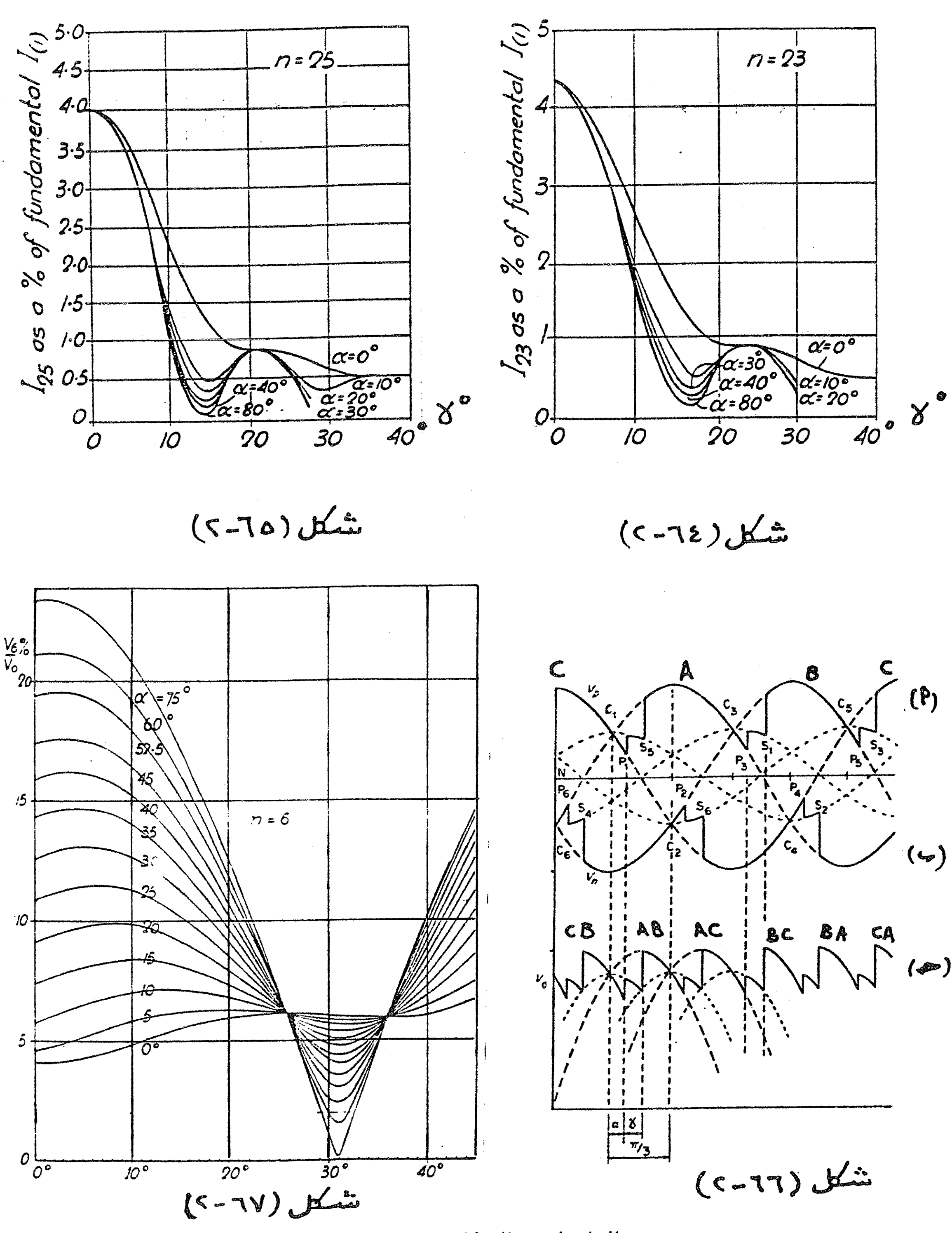
وعند $\gamma = 0\ , \alpha = \frac{\pi}{2}$ فان المعادلة تصبح

$$\frac{V_n}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2}\ \ n}{(n^2 - 1)} \simeq \frac{\sqrt{2}}{(n)}$$

وتعنى هذه المعادلة الزيادة السريعة للتوافقيات ذات الدرجات الاعلى مع زيادة α .

تيار التوافقيات بالملفات الثانوية للمحول (جانب d.c)

عند استخدام محول Y/y أو D/y أو Y/d مع عدد ٦ موحدات او ثيريزتورات فان هذه الدائرة تعرف بمبدل القنطرة الاحادية Single bridge converter وعند استخدام

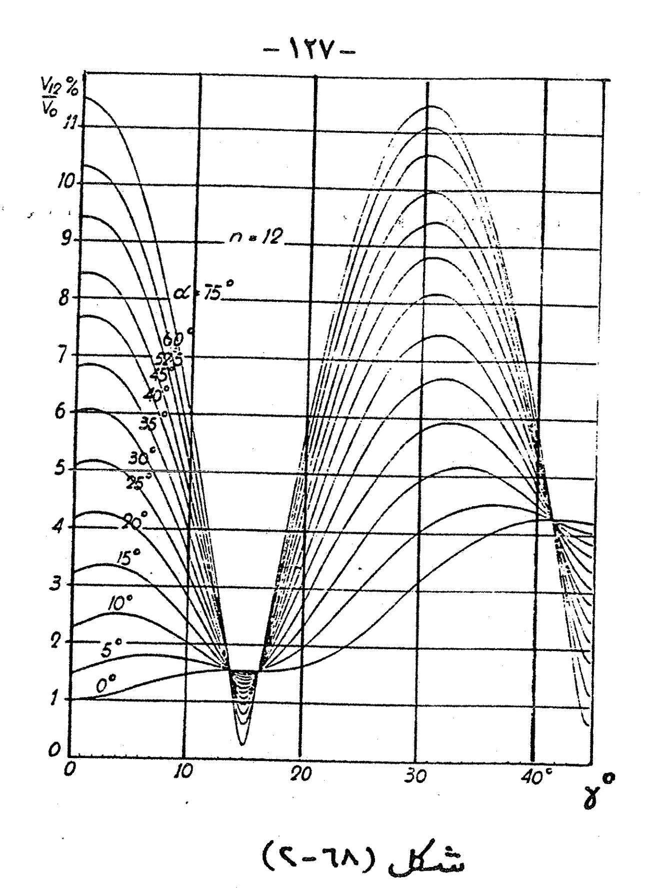


شكل (٦٥-٢)

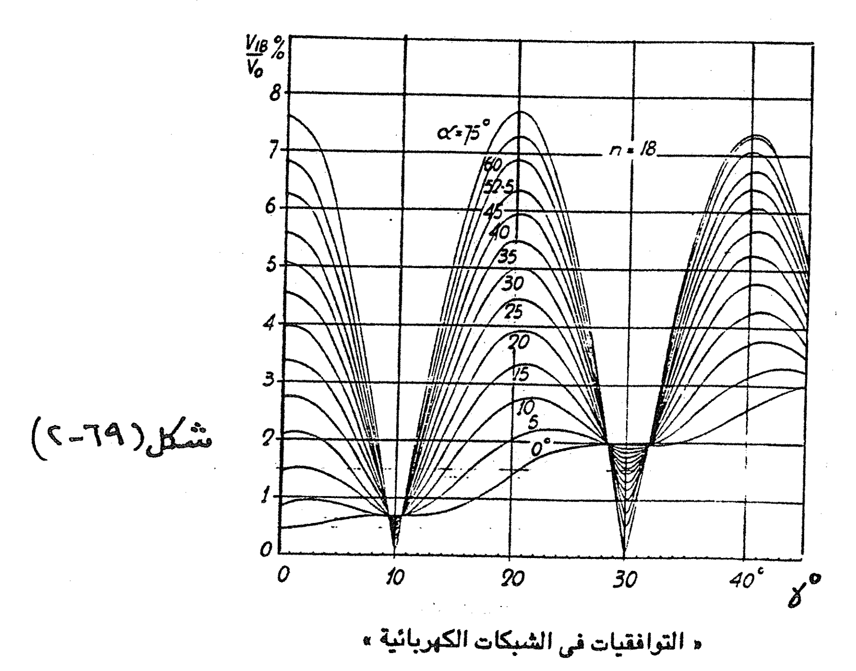
شكل (٦٤-٢)

شكل (٦٧-٢)

شكل (٦٦-٢)



شكل (٦٨-٢)



شكل (٦٩-٢)

محولين مع عدد ١٢ موحداً فتعرف الدائرة بالمبدل ذو القنطرتين *(Two bridges converter)* ، كما فى شكلى (٥٥–٢) ، (٥٦–٢) ويعتمد مسار تيارات التوافقيات على طريقة توصيل هذه القناطر وبتوصيل نقطة التعادل بالارضى نجهز مساراً لمرور عدد من التوافقيات .

وفيما يلى بعض طرق توصيل القناطر ، والموضحة بشكل (٧٠–٢)

عند توصيل قنطرتين على التوالى وبينهما زاوية ازاحة تساوى ٣٠° فان درجات التوافقيات الحادثة ارقام ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تكون متساوية وفى اتجاه معاكس للاتجاه المرحلى *(opposite in phase)* ، بينما درجات التوافقيات ارقام ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... تكون فى اتفاق مرحلى *(in phase)* ، ويمكن تأكيد هذا من المعادلة الآتية :

$$arc\ tan\ \theta_n = \frac{b_n}{a_n}$$

حيث θ_n زاوية التوافقية n مقاسة من المحور x بشكل (٥٦–٢) او (٥٧–٢) او (٦٦–٢) b_n ، a_n معاملات مركبات الجيب تمام *(cosine)* والجيب *(sine)* فى تحليل "فورير" لمعادلة جهد المخرج بشكل (٦٦–٢) وتنقسم معادلة الجهد الى الثلاثة أجزاء بالمعادلات رقم ٣ .

اى بتحليل فورير لمعادلات الجهد نحصل على a_n , b_n .

عندما تكون القنطرتين على نفس نقطة الارضى ، فان درجات التوافقيات ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تلغى ، بينما تجمع التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... وتمر بالدائرة كما فى شكل (٧٠–٢)ب .

عندما تكون نقطة التعادل مؤرضة فان التوافقيات ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تكون متساوية وفى اتجاه معاكس ، فى كل قنطرة ، بينما تكون فى اتفاق مرحلى فى مسار الارضى وتكون التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... للقنطرتين متساوية وفى اتفاق مرحلى وتمر بالموصلين ، كما فى شكل (٧٠–٢) جـ . اى ان تيارات التوافقيات ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تكون فى اتفاق مرحلى بالموصلين بينما تيارات التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ تكون فى اتجاه معاكس خلال الموصلين .

عند توصيل القنطرتين على التوالى وفى اتفاق مرحلى ، فان النظام يعمل بعدد ٦ أوجه *(six-phase operation)* سواء كانت نقطة التعادل مؤرضة او غير مؤرضة ، وتمر التوافقيات ٦،١٢،١٨،٢٤،٣٠،٣٦ ... فى الموصلين كما فى شكل (٧٠-٢) ء .

وعند توصيل القنطرتين على التوالى وبينهما زاوية ازاحة ٣٠° بدون توصيل أية أرضى ، كما فى شكل (٧٠-٢) هـ ، فان التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... تمر فى الموصلين ويوضح جدول (١٣-٢) درجات التوافقيات فى دائرة *d.c* تبعاً لعدد النبضات .

٢ - المبدلات ذات القدرات المتوسطة *Meduim size convertors*

تتراوح قدرات هذه المبدلات من عشرات الى مئات الكيلوات . ويستخدم فى اجهزة تحكم محركات التيار المتردد *(a.c)* التى تستخدم ترانزستورات القدرة *(power transistors)* والثيريزتورات ذات بداية الفصل *(Gate turn off thyristors)* (والتى يرمز لها *GTO*) .

تغذية محركات التيار المستمر *(d.c)* من المبدلات

يوضح شكل (٧١-٢) الدائرة المكافئة لمحرك *(d.c)* ، واذا فرضنا ان المحرك يغذى بمصدر جهد متردد $(V_m \sin \omega t)$ فان معادلة المحرك تكون

$$V_m \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt} + E$$

وبحل هذه المعادلة نحصل على قيمة تيار الحمل i

$$i = ke^{-Rt/L} + \frac{V_m}{(R^2 + \omega^2 L^2)} \sin(\omega t - \phi) - \frac{E}{R}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

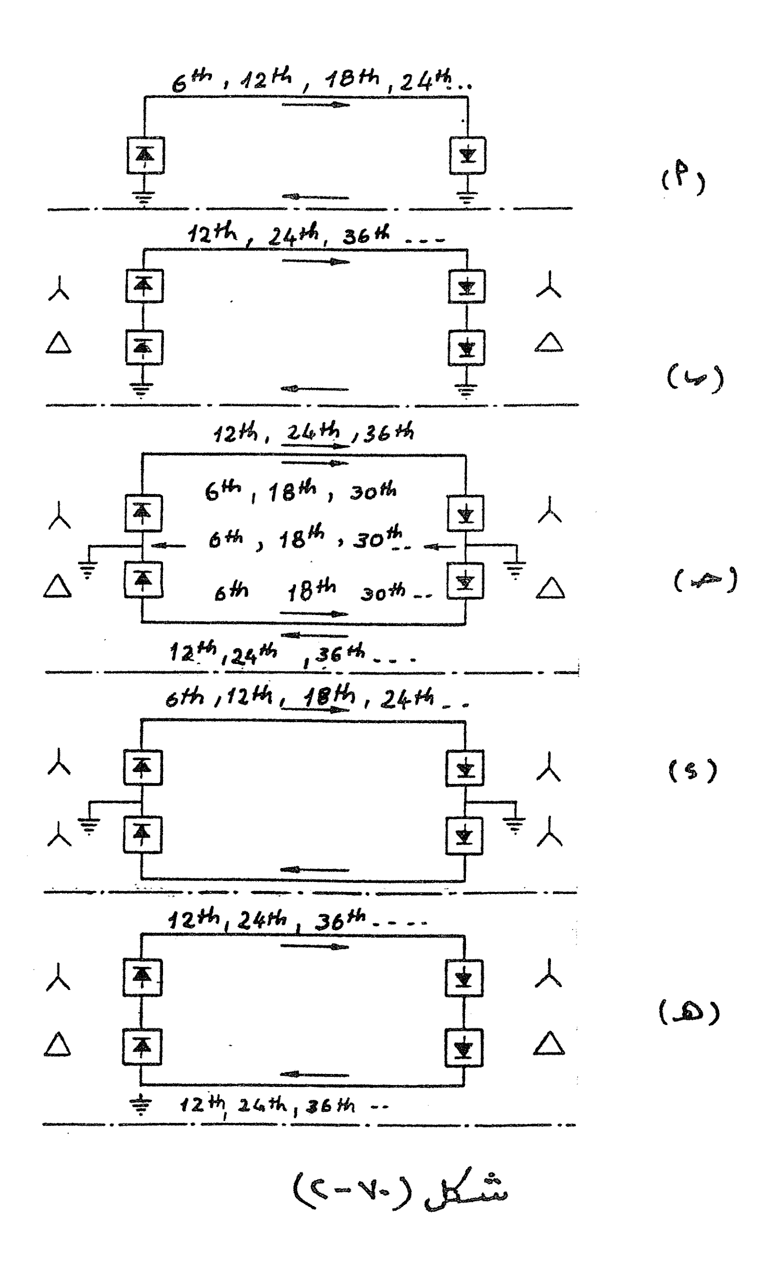
وتشتق k من حالات بداية التشغيل *(initial conditions)* .

ويمكن التحكم فى زاوية تأخير الاشعال *(Firing delay)* للثيريزتورات وذلك بان تكون صغيرة خلال حالات التحميل العادية ، بينما تزداد الزاوية خلال بداية تشغيل المحرك او عند التحميل الخفيف وعندئذ يمكن فصل التيار.ويوضح شكل (٧٢-٢) ومنحنى الجهد المستمر والتيار المتردد *(a.c)* المار بالوجه A وذلك فى حالة استخدام موحدات ذات ٦ نبضات . ويكون التيار الكلى بكل وجه عبارة عن نبضتين موجبتين وأخريتين

جدول (١٣-٢) درجات التوافقيات الحادثة تبعاً لعدد نبضات دائرة الموحد

(توافقيات التيار المستمر *d.c*)

درجات التوافقيات	دائرة الموحد ذات النبضات											
	٦	١٢	١٨	٢٤	٣٠	٣٦	٤٢	٤٨	٥٤	٦٠	٦٦	٧٢
٦	✓											
١٢	✓	✓										
١٨	✓		✓									
٢٤	✓	✓		✓								
٣٠	✓				✓							
٣٦	✓	✓	✓			✓						
٤٢	✓						✓					
٤٨	✓	✓		✓				✓				
٥٤	✓		✓						✓			
٦٠	✓	✓			✓					✓		
٦٦	✓										✓	
٧٢	✓	✓	✓	✓		✓						✓



6th , 12th , 18th , 24th..
(أ)
12th , 24th, 36th ...
(ب)
12th , 24th , 36th
6th , 18th , 30th
6th , 18th , 30th..
6th 18th 30th ..
(حـ)
12th , 24th , 36th ...
6th , 12th , 18th , 24th ..
(د)
12th , 24th , 36th ....
(هـ)
12th , 24th , 36th ..

شكل (٧٠-٢)

سالبتين.وتكون معادلة تيار الوجه A (البداية عندما يكون الجهد V_{AB} عند قيمة الذروة) كالآتى :

(١) فى الحدود $\theta_1 < \omega t < \theta_2$

$$i = \frac{V_m}{R}\left\{\cos\phi\cos(\omega t - \phi) - \frac{E}{V_m} + \left[\frac{E}{V_m} - \cos\phi\,(\cos\theta_1 - \phi)\right] e^{(-R/\omega L)(\omega t - \theta_1)}\right\}$$

(٢) فى الحدود $\theta_2 < \omega t < \theta_4$ حيث $\theta_3 = (\theta_1 + \frac{\pi}{3})$

$$i = \frac{V_m}{R}\left\{\cos\phi\cos(\omega t - \frac{\pi}{3} - \phi) - \frac{E}{V_m} + \left[\frac{E}{V_m} - \cos\phi\cos(\theta_1 - \phi)\right] e^{(-R/\omega L)(\omega t - \frac{\pi}{3} - \theta_1)}\right\}$$

(٣) فى الحدود $\theta_5 < \omega t < \theta_6$ حيث $\theta_5 = (\theta_1 + \pi)$

$$i = \frac{-V_m}{R}\left\{\cos\phi\cos(\omega t - \pi - \phi) - \frac{E}{V_m} + \left[\frac{E}{V_m} - \cos\phi\cos(\theta_1 - \phi)\right] e^{(-R/\omega L)(\omega t - \pi - \theta_1)}\right\}$$

(٤) فى الحدود $\theta_7 < \omega t < \theta_8$ حيث $\theta_7 = (\theta_1 + 4\pi/3)$

$$i = \frac{-V_m}{R}\left\{\cos\phi\cos(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \phi) - \frac{E}{V_m} + \left[\frac{E}{V_m} - \cos\phi\cos(\theta_1 - \phi)\right] e^{(-R/\omega L)(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta_1)}\right\}$$

بتحليل "فورير" لمعادلات التيارات نجد انها تحتوى على مركبة التوافقية الخامسة بقيمة كبيرة .

تصمم محركات التيار المستمر التى تعمل مع مبدلات من الثيريزتور بان تزيد محاثة المنتج (*armature inductance*) للتغلب على عدم استمرارية التيار وللتبسيط تستخدم الطريقة التقريبية للحصول على مركبات التوافقيات بالتيار المتردد $a.c$ بدلالة نسبة التموجات(*ripple ratio*) الآتية :

$$r = \frac{I_r}{I_d}$$

ويوضح شكل (٧٣-٢) أ تيار المنتج *(armature current)* بدلالة I_d , I_r

حيث :

I_d متوسط التيار المستمر المار بعضو المنتج للمحرك

I_r التموجات المترددة *(alternating ripple)* للتيار المستمر

(مع اهمال تأثير ممانعة التوحيد)

ويوضح شكلى (٧٣-٢) ب،جـ تيار الثيريزتور والتيار المتردد *(a.c)* .

وبتحليل "فورير" للتيار المتردد لمبدل ٦ نبضات تكون معادلات تيارات التوافقيات (كنسبة من المركبة الاساسية) كالآتى

$$I_n = 100 \left(\frac{1}{2} + \frac{6.46\,r}{n-1} - \frac{7.13\,r}{n} \right) (-1)^k \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\; n = kp-1$$

$$I_n = 100 \left(\frac{1}{n} + \frac{6.46\,r}{n+1} - \frac{7.13\,r}{n} \right) (-1)^k \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\; n = kp+1$$

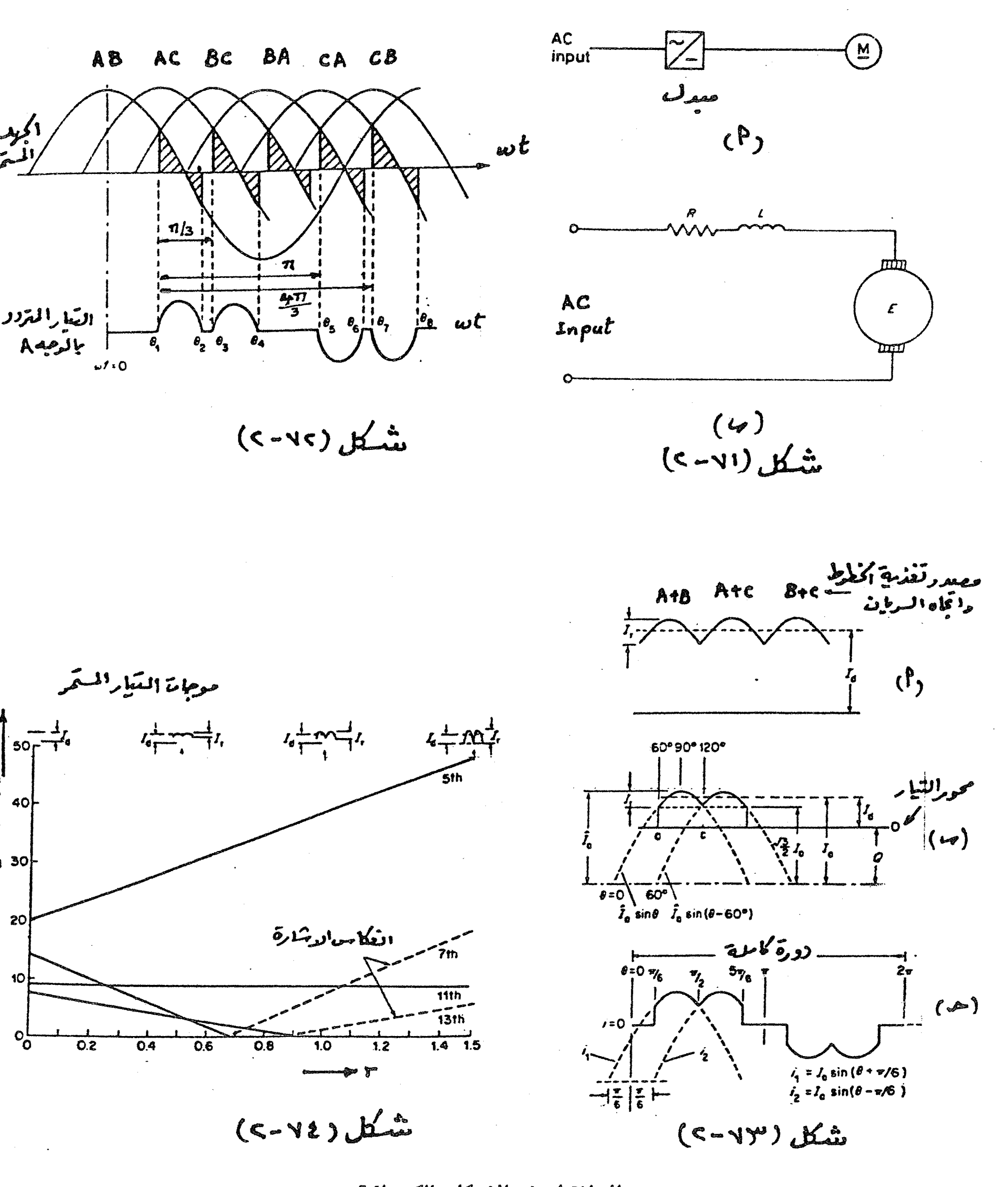
تم تسجيل هذه المعادلات بدلالة r فى شكل (٧٤-٢) للحدود الآتية :

من $r=0$ اى عند ممانعة تساوى مالانهاية

حتى $r=1.5$ اى قيمة محددة للتيار .

ويلاحظ من الشكل انه عند زيادة r تزيد التوافقية الخامسة

ومن دوائر التوحيد شائعة الاستخدام والتى تمتاز برخص ثمنها ، الدائرة الموضحة بشكل (٧٥-٢) أ وتعرف بدائرة توحيد التحكم النصفى *(Half - controlled rectification)* وتستخدم لمحركات التيار المستمر ذات السرعات المختلفة ، وينتج عنها نفس التوافقيات الحادثة من دائرة التوحيد الكلى . ويوضح شكل (٧٥-٢) ب موجات جهد التيار المستمر وتيار وجهد المصدر للوجه A .


AB AC BC BA CA CB
wt
π/3
π
4π/3
θ1 θ2 θ3 θ4 θ5 θ6 θ7 θ8
التيار المتردد بالوجه A
شكل (٢-٧٢)
AC input
M
مبدل
(أ)
R L
AC Input
E
(ب)
شكل (٢-٧١)
موجات التيار المستمر
5th
7th
11th
13th
انعكاس الإشارة
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.5
شكل (٢-٧٤)
مصدر تغذية الخط واتجاه السريان
A+B A+C B+C
(أ)
60° 90° 120°
محور التيار
(ب)
θ=0
60°
دورة كاملة
θ=0 π/6 π/2 5π/6 π 2π
(هـ)
$i_1 = I_0 \sin(\theta + \pi/6)$
$i_2 = I_0 \sin(\theta - \pi/6)$
شكل (٢-٧٣)

ومن أمثلة دوائر التوحيد المستخدمة لمحركات التيار المستمر لتشغيل وسائل النقل الكهربى *(railway traction)* الدائرة الموضحة شكل (٧٦-٢) وتعرف بدائرة القدرة الانتقالية *(Locomotive power circuit)* او بقناطر التحكم المنفصلة *(Individual controlled bridges)* حيث تستخدم قنطرتى توحيد على التوالى للحصول على الجهد المستمر V_d والتى تغذى على التوازى محركين تيار مستمر .

وتتمثل حالة بداية التشغيل بالنقاط الآتية :

- تكون القوة الدافعة الكهربائية *(emf)* الخلفية لمحركات التيار المستمر مساوية للصفر .
- يكون جهد التيار المستمر المغذى منخفضاً .
- تكون زاوية التأخير كبيرة .

وعلى ذلك نجد انه خلال دورة السرعة الاولية المصحوبة بأقصى تيار لمحركات *d.c* ، ان قنطرة التوحيد تنتج أسوأ تيارات التوافقيات واقل معامل قدرة،وعادة ، عند السرعات المنخفضة ، تلغى احدى القنطرتين مع امكانية التحكم فى زاوية تشغيل الاخرى وعندما تبدأ السرعة فى الزيادة ، تعمل القنطرة الاخرى عند أقل زاوية تأخير وتتحكم فى زاوية القنطرة الاولى . ويوضح شكل (٧٧-٢) موجات التيار والجهد للدائرة بالشكل(٧٦-٢).

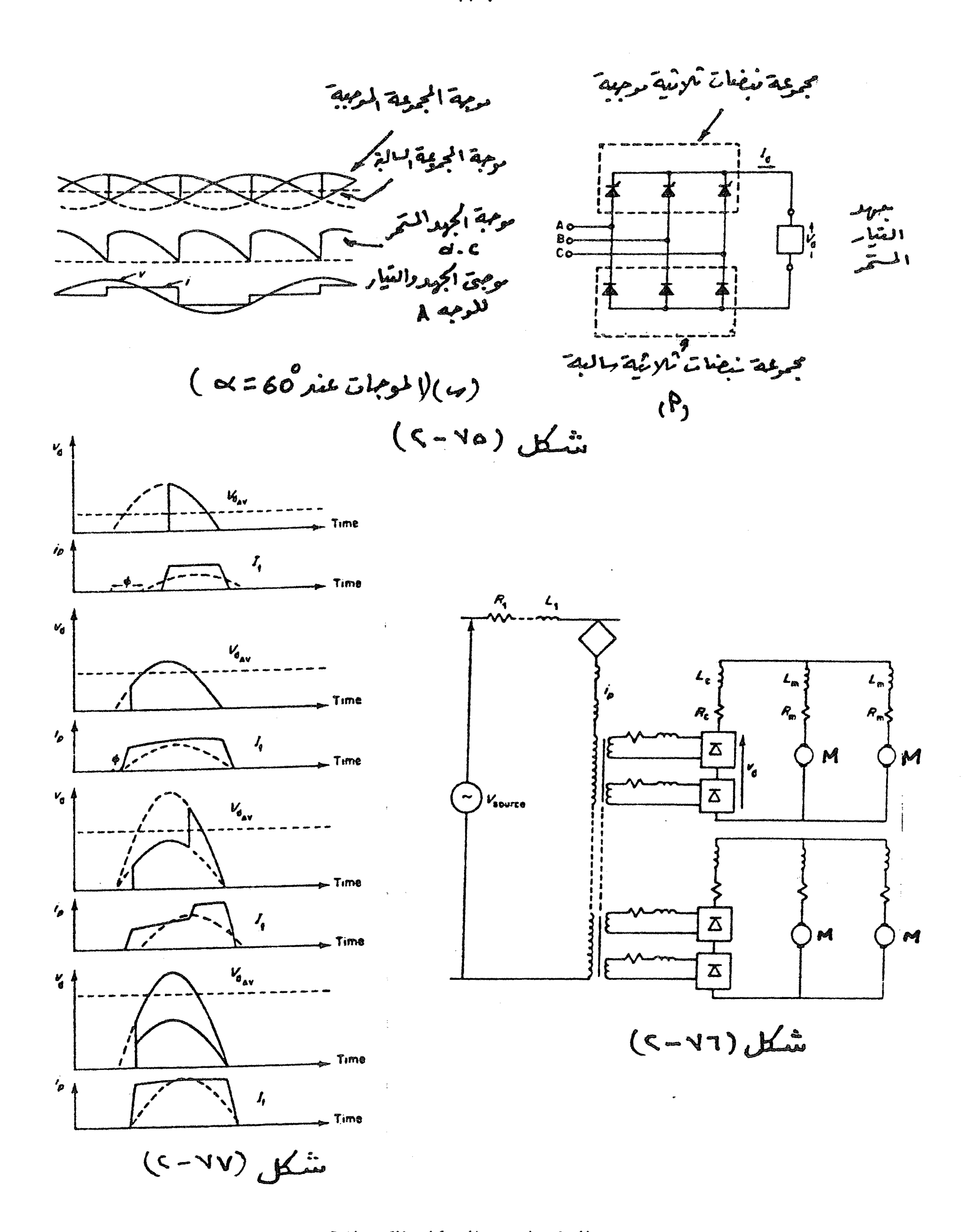
وبتحليل موجات التيارات بشكل (٧٧-٢) نجد انها تحتوى على التوافقيات الثالثة ـ الخامسة ـ السابعة ـ التاسعة ... والموضحة بشكل (٧٨-٢) . ويوضح شكل (٧٩-٢) تغذية مجموعتين من الثيريزتور متماثلتين من مصدر ثلاثى الاوجه ولكل منهما زاوية تحكم فى الاشعال مستقلة ـ كما يوضح ايضاً موجة المدخل للوجه *(C-N)* ، وموجة تيار الوجه C لكل من المجموعتين فى الحالات الآتية :

يمثل شكل (٧٩-٢) أ حالة تماثل زاوية التأخير ، واشتغال حقيقى ١٢ نبضة .

يمثل شكل (٧٩-٢) ب زاوية تأخير تساوى °٣٠ واشتغال زائف لعدد ٦ نبضات.

ويمثل شكل (٧٩-٢) جـ زاوية تأخير تساوى °١٥٠ وتشغيل زائف لعدد ٦ نبضات .

كما يمثل شكل (٧٩-٢) ء زاوية تأخير تساوى °١٨٠ وتشغيل زائف لعدد ٦ نبضات



(ب) الموجات عند $\alpha = 60^\circ$

(أ)

شكل (٧٥-٢)

شكل (٧٦-٢)

شكل (٧٧-٢)

ومن الاستخدامات الاخرى للمبدلات ذات القدرات المتوسطة استخدام مبدل وعاكس لتشغيل محرك تيار متردد $a.c$ ، كما فى شكل (٨٠-٢) أ .

ويحتاج العاكس (invertor) لجهد تيار مستمر ثابت للحصول منه على موجة مترددة ويوضح شكل (٨٠-٢) ب مكونات عاكس تحكم سداسى ، وقد تم توصيل موحد على التوازى مع كل ثيريزتور كتغذية خلفية (Feedback) . وتستنتج معادلات الجهد باتباع جدول التشغيل التتابعى للثيريزتورات وموجات الجهد بشكل (٨١-٢) كالآتى :

بفرض أن V_A , V_B , V_C هى جهود الاوجه على اطراف المحرك فان جهد نقطة التعادل يكون :

$$V_N = \frac{1}{3} (V_A + V_B + V_C)$$

ويكون الجهد بين الوجه A ونقطة التعادل N

$$V_{AN} = V_A - V_N = \frac{1}{3} (2V_A - V_B - V_C)$$

وبفرض تساوى معاوقة الحمل للمحرك فان توافقيات الجهد V_{AN} للدرجة n تكون

$$V_{AN(n)} = \frac{1}{3} (2V_{A(n)} - V_{B(n)} - V_{C(n)})$$

$$= [2V_{mn} \sin (n\omega_1 t) - V_{mn} \sin n(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}) -$$

$$V_{mn} \sin n (\omega_1 t - \frac{2\pi}{3})]$$

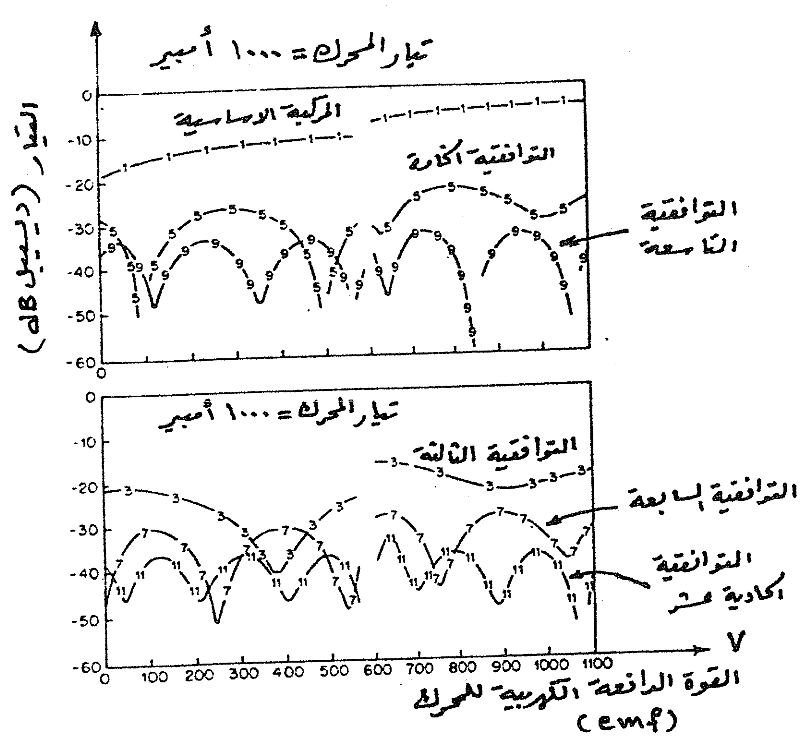
$$= \frac{2}{3} V_{mn} \sin n\omega_1 t (1 - \cos 2 n \pi/3)$$

$$= \frac{2}{3} V_{A(n)} (1 - \cos 2 n \pi/3)$$

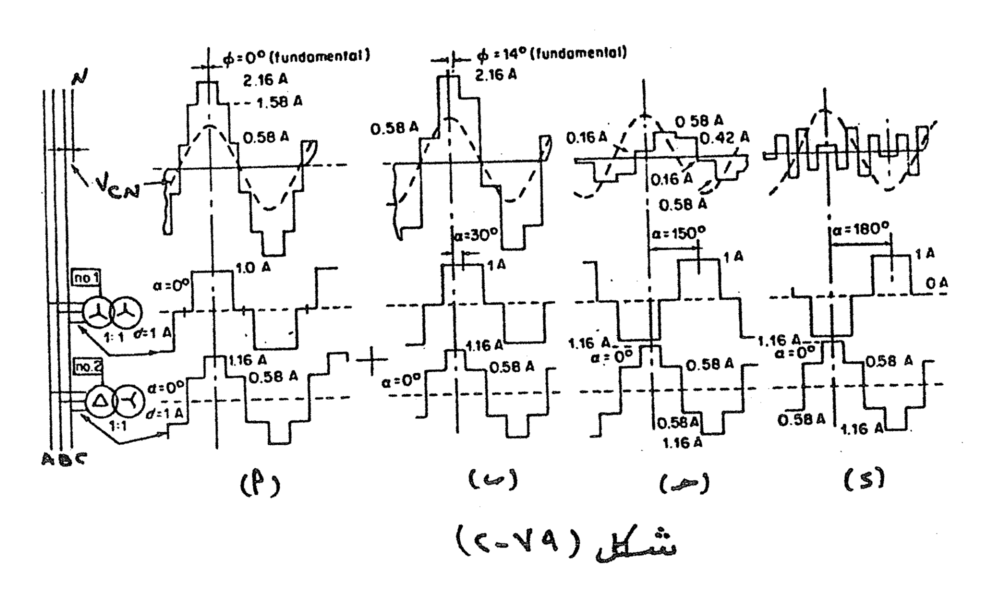
وبالمثل تكون توافقيات الجهد للوجهين B,C كالآتى

$$V_{BN(n)} = \frac{2}{3} V_{B(n)} (1 - \cos 2n \pi/3)$$

$$V_{CN(n)} = \frac{2}{3} V_{C(n)} (1 - \cos 2n \pi/3)$$



شكل (٧٨-٢)



شكل (٧٩-٢)

ولجميع توافقيات التتابعية السالبة والموجبة نجد أن

$$Cos\ 2n\ \pi/3 = -\frac{1}{2}$$

وعلى ذلك

$$V_{AN(n)} = V_{A(n)}$$

$$V_{BN(n)} = V_{B(n)}$$

$$V_{CN(n)} = V_{C(n)}$$

ولنظام ثلاثى الاوجه متزن ، فان لتوافقيات التتابعية الصفرية نجد أن

$$Cos\ 2\ \pi n\ /3 = 1$$

وعلى ذلك

$$V_{AN\ (n)} = V_{BN(n)} = V_{CN(n)} = 0$$

وتكون معادلة جهد الوجه للمحرك هى

$$V_p = \frac{2}{\pi} V_{bus} \sum \{ \frac{1}{(6k+1)} sin\ (6k+1)\ \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)}\ sin(6k+5)\ \omega_1 t \}$$

وبتحليل فورير لمعادلة الجهد نجد عدم احتوائها على التوافقيات الثلاثية الفردية *(Triplen)* بينما تحتوى موجات جهود المدخل للعاكس على مركبات التوافقيات الثلاثية الفردية وتعتبر المحاثة المغناطيسية L_m للمحرك كمرشح تكاملى *(Integrating Filter)* لمرور التيار i_p نتيجة الجهد V_p ، اى ان

$$i_p = \frac{1}{L_m} \int_{t_0}^{t} V_p\, dt$$

وتكون معادلة توافقيات الجهد

$$V_{p(n)} = \frac{2}{\pi n} V_{bus}\, sin\ (n\omega_1 t)$$

وعلى ذلك تكون معادلة توافقيات التيار

$$i_{p(n)} = \frac{2V_{bus}}{\pi\ n\ L_m} \int_{t_0}^{t} sin(n\omega_1 t)\ dt = \frac{2V_{bus}}{\pi\ n^2 \omega_1 L_m}\ cos\ (n\omega_1 t)$$

وتكون معادلة تيار المغنطة باستخدام معادلة الجهد V_p

$$i_p = \frac{2V_{bus}}{\pi\, \omega_1\, L_m} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(6k+1)^2} \cos(6k+1)\, \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)^2} \cos(6k+5)\, \omega_1 t \right]$$

بينما معادلة الفيض المغناطيسى للثغرة الهوائية ، لعدد لفات تساوى N للمحاثة المغناطيسية هى

$$\Phi_p = \frac{2V_{bus}}{\pi\, \omega_1 N} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(6k+1)^2} \cos(6k+1)\, \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)^2} \cos(6k+5)\, \omega_1 t \right]$$

وبتحليل المعادلات Φ_p , i_p , V_p نحصل على التوافقيات منسوبة الى المركبة الاساسية كما فى جدول رقم (١٤-٢)

جدول(١٤-٢)

درجة التوافقية n	توافقية V_p كنسبة من المركبة الاساسية	توافقية i_p كنسبة من المركبة الاساسية	توافقية Φp كنسبة من المركبة الاساسية
١	١	١	١
٥	٠,٢	٠,٠٤	٠,٠٤
٧	٠,١٤٣	٠,٠٢	٠,٠٢
١١	٠,٠٩١	٠,٠٠٨	٠,٠٠٨
١٣	٠,٠٧٧	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦
١٧	٠,٠٥٩	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣
١٩	٠,٠٥٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣
٢٣	٠,٠٤٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٢٥	٠,٠٤٠	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢

٣ - المبدلات ذات القدرات الصغيرة *Low Power Convertors*

من الاحمال ذات المبدلات منخفضة القدرة والتى تكون مصدراً للتوافقيات هى :

- أجهزة التلفزيون والحاسبات الآلية .

- شاحن البطاريات

وفيما يلى توضيح مبسط لكل منهما

- أجهزة التليفزيون *(Television sets)*

تحتوى دائرة تغذية التلفزيون على موحدات ومكثف تنعيم ذو درجة عالية . ففى الاجهزة القديمة تحتوى دائرة الاستقبال على دائرة توحيد نصف موجة والتى تنتج جهد مستمر يحتوى على توافقيات ويوضح شكل (٨٢-٢) قياسات لفترة زمنية محددة ، لمحول من جهة الجهد المتوسط ، ويلاحظ حدوث أقصى قيمة للتوافقيات عند نفس الزمن (t_1) ويحتوى الحمل المقاس على التوافقيات الثانية والثالثة والرابعة والخامسة .

وقد استخدم بعد ذلك موحدات الموجة الكاملة ، كما فى شكل (٨٣-٢) ، تبعها اضافة ثيريزتورات ثم التحكم فى اشارة اشعالها لكى تحدث بعد قيمة الذروة الرئيسية وذلك حتى يكون للدوائر الكهربائية المغذاه من الثيريزتورات قيمة ذروة اقل ، وهذا يؤدى الى نبضات فى موجات التيار تحتوى على مركبات توافقيات عالية .

ويستهلك مستقبل التلفزيون الملون تيار ذروة اكبر مرتين او ثلاثة مرات من التيار المستهلك لمستقبل التليفزيون ذى الصورة المكونة من لونين ((ابيض - اسود)) .

وبأجراء تحليل "فورير" لموجة التيار الموضحة بشكل (٨٣-٢) نجد انها تحتوى على التوافقيات تبعاً للمعادلة الآتية .

$$I_n = \frac{8\,\alpha I}{\pi} \sum_n \frac{\cos n\alpha\pi}{1-\pi^2\,\alpha^2\,n^2} \cos n\omega t$$

حيث

$$n = 1,3,5 \,........\infty$$

$$\alpha = \frac{\theta}{T}$$

ويوضح شكل (٨٣-٢) القيم I, T, θ

وتتراوح قيمة α بين ٠,٠٨ الى ٠,١٨ لمجموعات التليفزيونات ، بصرف النظر عن دوائر تغذيتها

وتختلف قيم تيارات التوافقيات بمجموعات التليفزيونات تبعاً لنوع دائرة المستقبل *(receiver)* بالتليفزيون ، ويوضح جدول (١٥-٢) قيم تيارات التوافقيات الفردية تبعاً لنوع دائرة المستقبل .

جدول(١٥-٢)

درجة التوافقية	نوع المستقبل			
	تليفزيون ابيض / اسود		تليفزيون ملون	
	صمامات *Tubes*	ترانزستورات *Transistors*	قنطرة ديودات *diode bridge*	ثيريزتورات *Thyristors*
٣	٠,٥٣	٠,٣٢	٠,٧٣	٠,٨٢
٥	٠,٣١	٠,٢٥	٠,٥٩	٠,٦٦
٧	٠,١٣	٠,١٥	٠,٤٣	٠,٣٤
٩	٠,٠٥٥	٠,٠٨	٠,٢٧	٠,١٤
١١	٠,٠٤٥	٠,٠٤	٠,١٥	٠,٠٩
١٥	٠,٠٣	٠,٠٣	,٠٤٥	٠,٠٤

ويلاحظ من جدول (١٥-٢) الآتى :

- ارتفاع قيم التوافقية الثالثة .
- قيم التوافقيات بالتلفزيونات الملونة اكبر من القيم المقابلة بالتليفزيون ابيض / اسود .
- ارتفاع قيم التوافقيات الثالثة والخامسة لمستقبل من الثيريزتورات

كذلك تختلف قيم التوافقيات اذا وصل اكثر من تليفزيون على التوازى ، كما فى جدول(١٦-٢)

جدول(١٦-٢)

عدد التليفزيونات / وجه		درجة التوافقية ١	٣	٥	٧	٩
١	التيار $I_1 (A)$	,٨	,٦٧	,٤٨	٠,٢٩	٠,٠٩
١٠	تيار التعادل $I_{10}(A)$	٨	٥,٨	٣,٥	١,٧	٠,٧
	النسبة $\frac{I_{10}}{10 I_1}$	١	,٨٦	٠,٧٣	٠,٥٨	٠,٧٧
	تيار الوجه $I_{10} (A)$	١	١٧,٤	٠,٧	٠,٦	٢,١
	النسبة $\frac{I_{10}}{10 I_1}$	,١٢	٢,٦	,١٤	٠,٢	٢,٣
٨٠	تيار التعادل $I_{80}(A)$	٦٤	٣٧,٦	١٣,٢	٣,٨	١,٧
	النسبة $\frac{I_{80}}{80 I_1}$	١	٠,٧	٠,٣٤	٠,١٦	٠,٢٣
	تيار الوجه $I_{80} (A)$	٩,٦	١١٦	٣	٠,٩	٤,٦
	النسبة $\frac{I_{80}}{80 I_1}$	,١٥	٢,١	٠,٠٨	٠,٠٤	٠,٦٣

شاحن البطاريات

يحول الشاحن الجهد المتردد (a.c) الى مستمر (d.c) ويتم به شحن البطاريات ويوضح شكل (٨٤-٢) أ دائرة شاحن بطاريات يستخدم فى المركبات الكهربائية (Electric vehicle battery charge) ويعتمد حدوث التوافقيات على الجهد الابتدائى للبطارية ، وتنتج التوافقيات الكلية من مجموعة الشواحن المتصلة على نفس القضبان اعتماداً على الزمن والاحتمالات العشوائية للتشغيل .

من شكل (٨٤-٢) ب ، يحدث التوصيل عندما تكون V اكبر من E وعلى ذلك فان الزاوية θ تساوى

$$\theta = \sin^{-1} \frac{E}{V}$$

وتكون معادلة تيار الشحن كالآتى

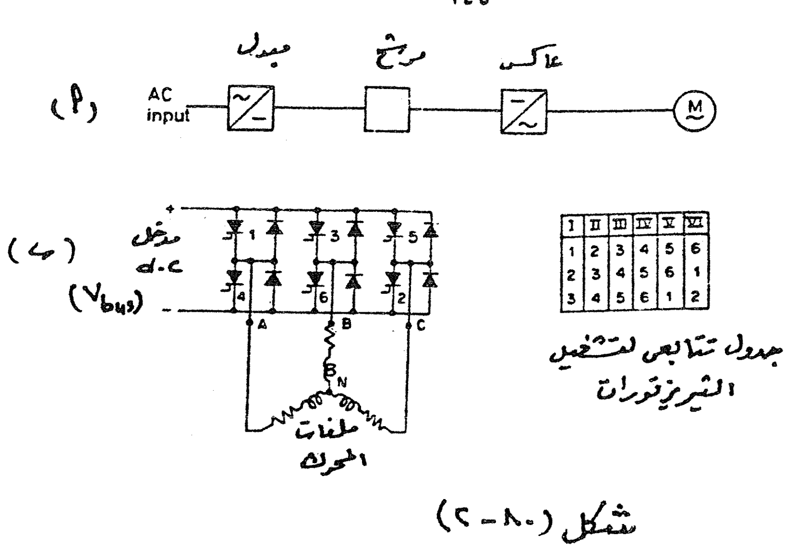
$$I = \frac{V_m}{R} \left\{ \sin(\omega t - \Phi) - \sin(\theta - \Phi) - \frac{\sin\theta}{\cos\Phi} \exp[(\theta - \omega t)\cot\Phi] - \frac{\sin\theta}{\cos\Phi} \right\}$$

حيث $\theta < \omega t < \gamma$

ويوضح شكل (٨٤-٢) ب ايضاً موجة تيار المغنطة للمحول (i_m).ونتيجة وجود التوافقيات يصبح التيار المغذى لمجموعة الشاحن غير جيبى ، اى تظهر التوافقيات فى موجة الجهد .

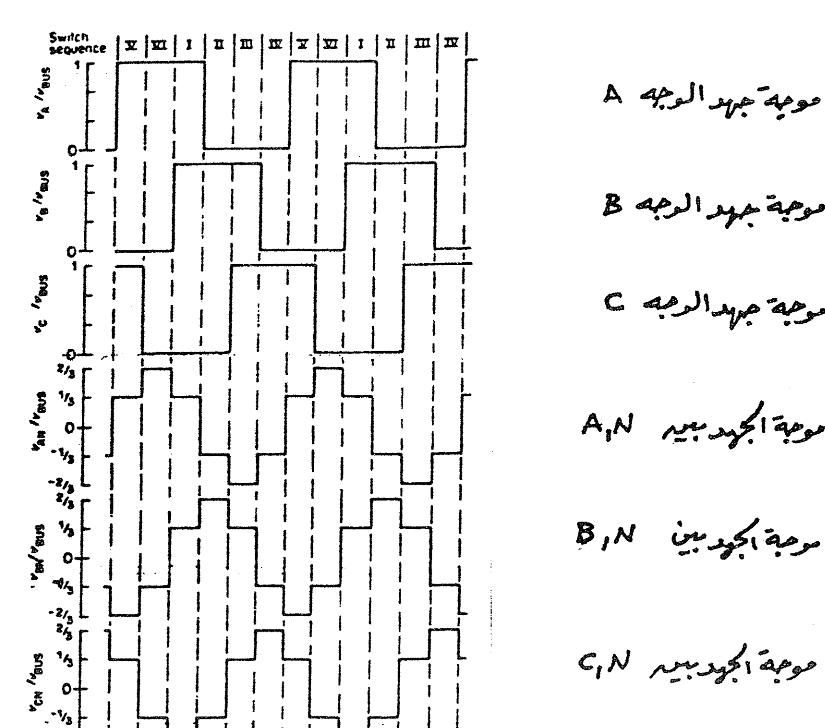
المبدل الدورى (Cycloconvertor)

يستخدم هذا النوع من المبدلات لتغذية المحركات المتزامنة الكبيرة مثل المستخدمة فى عمليات الدرافيل الانبوبية (tube mills) فى صناعة الاسمنت ، ويعرف المبدل الدورى بانه جهاز تحويل الطاقة ونحصل منه على قدرة استاتيكية عند تردد مختلف عن تردد المصدر . ويوضح شكل (٨٥-٢) مكونات المبدل الدورى وهو عبارة عن زوجين من المبدلات كل منهما مبدل ذو ٦نبضات ، ومتصلين على التوازى عكسياً ، ويتم التحكم فى المبدل عن طريق تغيير زمن نبضات اشعال الثيريزتورات ، وبذلك نحصل على جهد متردد من المبدل كما فى شكل (٨٦-٢) أ لدائرة مبدل ٦ نبضات ـ زاوية ازاحة ٦٠° ـ نسبة التموجات (r) تساوى ٠,٥ . وتعتمد موجة تيار المخرج على الحمل . ويوضح شكل (٨٦-٢) ب موجة تيار المخرج . بينما يوضح شكل (٨٦-٢) جـ تتابع تشغيل القنطرة رقم (١) ويوضح شكل (٨٦-٢) ء تتابع تشغيل القنطرة رقم (٢).و يحتوى تيار المدخل الموضح

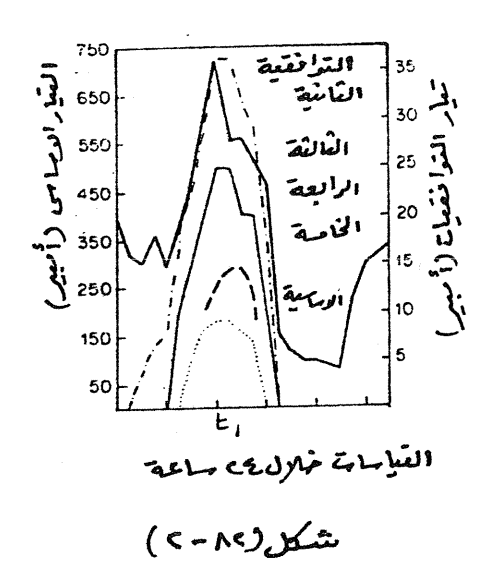


I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	1
3	4	5	6	1	2

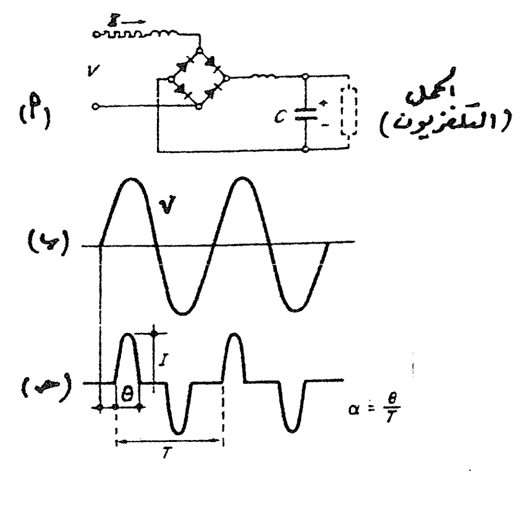
شكل (٨٠-٢)



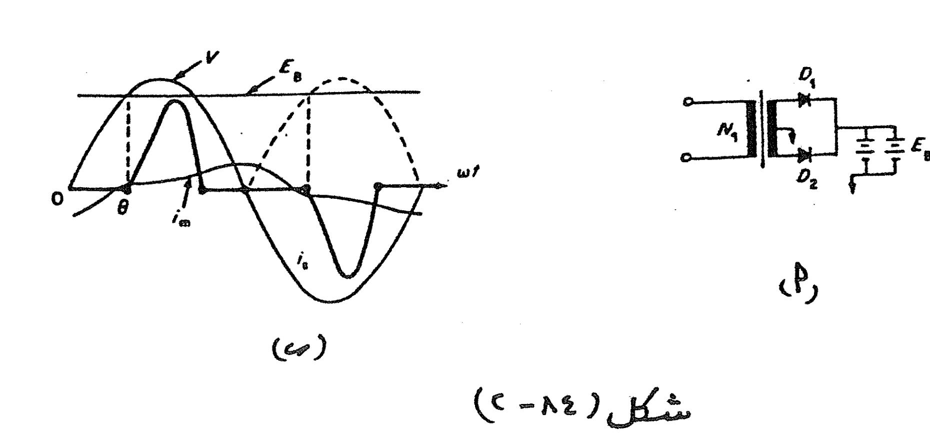
شكل (٨١-٢)



شكل (٨٢-٢)



شكل (٨٣-٢)



شكل (٨٤-٢)

بشكل (٨٧-٢) ، للمبدل الدورى على توافقيات لها تردد تبعاً للمعادلة

$$f_{har} = (kp + 1) f + 6\, m f_2$$

or .... (1)

$$n = (kp + 1) + 6\, m \frac{f_2}{f}$$

حيث

p = عدد النبضات

f_2 = تردد مخرج المبدل الدورى

f = التردد الاساسى للمصدر

n = الاعداد الترتيبية للتوافقيات = $\frac{f_{har}}{f}$

$k = \pm 1 \,, \pm 2 \,, \pm 3, \ldots\ldots$

$n = 0 \,, \pm 1 \,, \pm 2 \,, \ldots.$

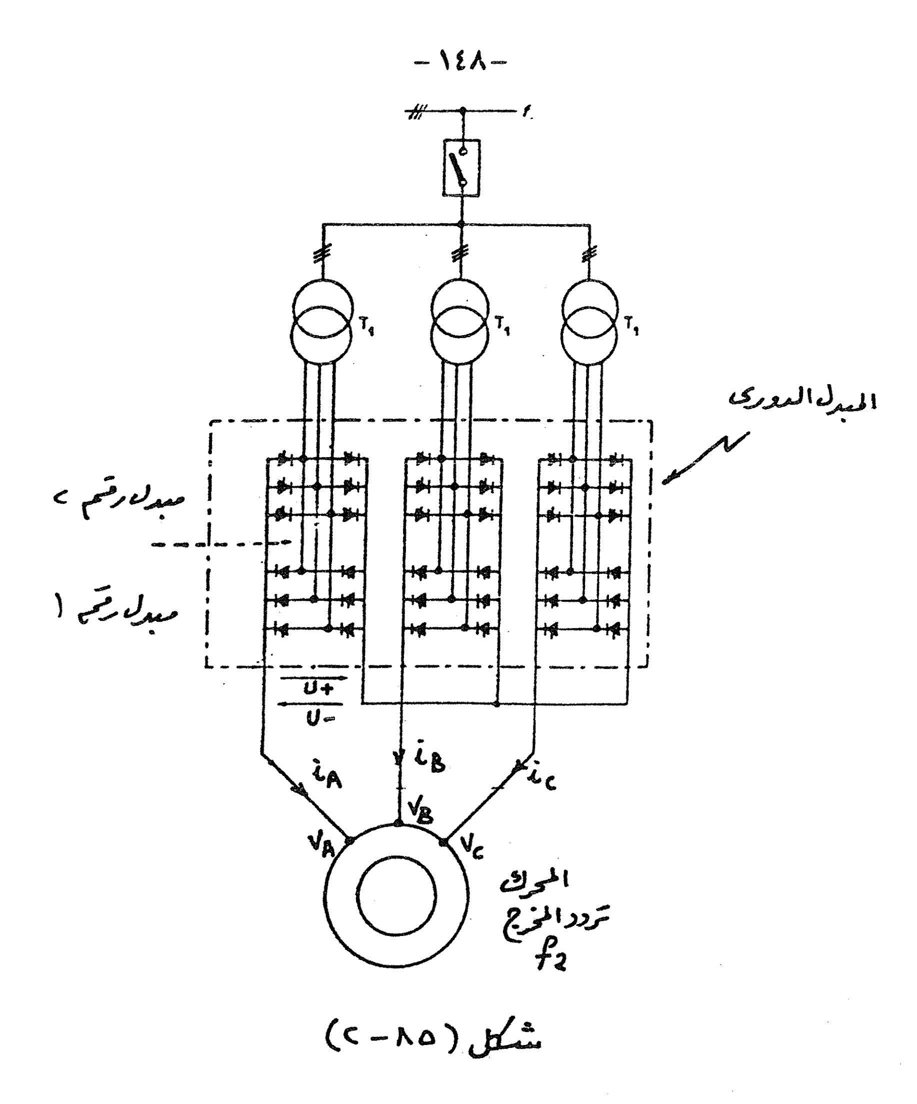
تتكون معادلة تردد التوافقيات من الجزئين التاليين :

- الجزء الاول $(kp + 1)$ عبارة عن الاعداد الترتيبية نتيجة الموحدات.

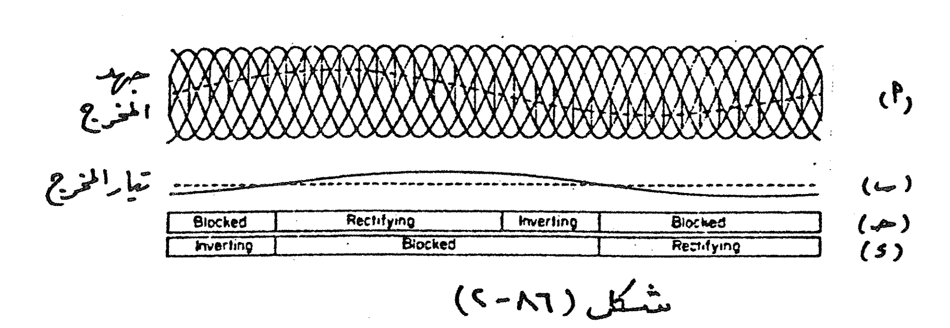
- الجزء الثانى $(6m \frac{f_2}{f_1})$ يمثل النطاق الجانبى *(sidebands)* للتوافقيات الاولى ، ويتغير العرض *width* مع التردد f_2 اى مع سرعة المحرك،يفضل استخدام طريقة الطيف الترددى *(Frequency spectrum)* عن استخدام تحليل فورير لرسم العلاقة بين تردد التوافقيات ونسبة تيار التوافقيات فمثلاً يوضح شكل (٨٨-٢) هذه العلاقة لمبدل دورى - ٦ نبضات - ثلاثة أوجه تردد المخرج ٥ هرتز ، وتردد المدخل ٦٠ هرتز .

بينما يوضح شكل (٨٩-٢) أ العلاقة بين تيار التوافقيات كنسبة من التيار الاساسى (I_n / I_1) والاعداد الترتيبية n من العلاقة رقم (١) وذلك عند تردد مخرج يساوى ٣,٥ هرتز . كذلك يوضح شكل (٨٩-٢) ب العلاقة بين $n_1 = 5,7,11,13$ وتردد المخرج للمبدل تبعاً للمعادلة (١) ايضاً

ويسبب المبدل الدورى ذات السرعات المتغيره مشاكل خطيرة ، نتيجة تغيير تردد المخرج عند تغيير السرعة ، وبالتالى فان الطيف الترددى يتغير وعلى ذلك تكون



شكل (٨٥-٢)

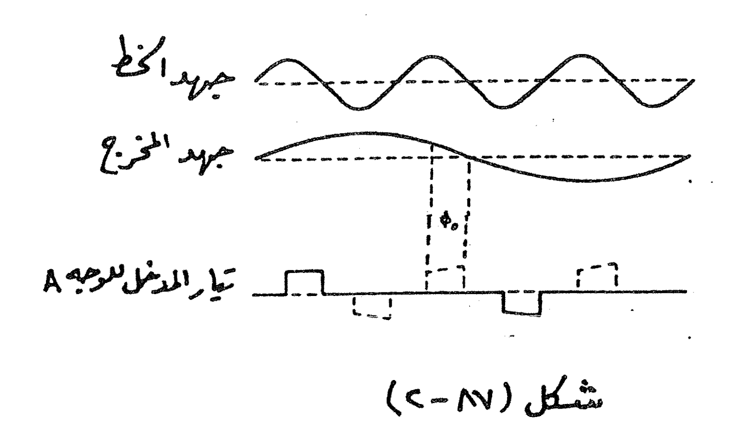


شكل (٨٦-٢)

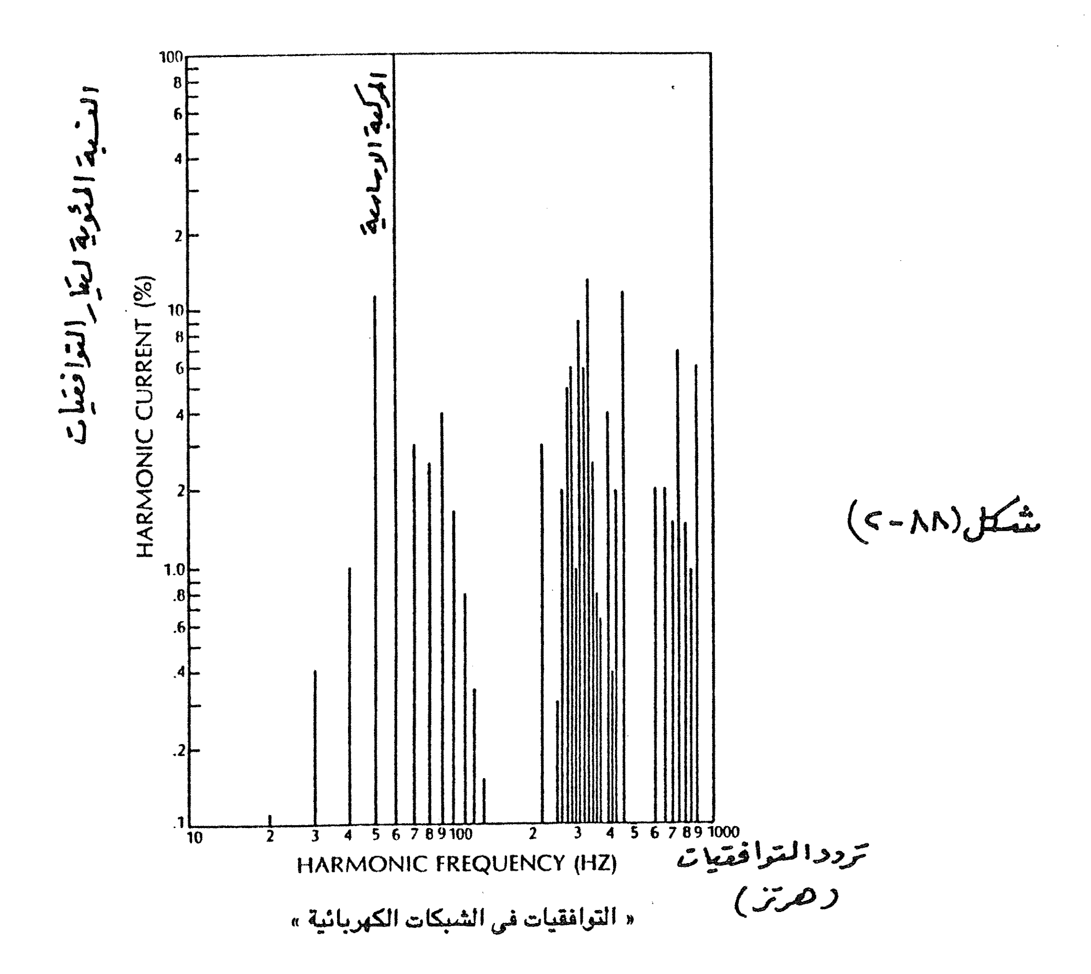
مرشحات التوليف *(tuned filters)* غير فعالة .

تضمين نبضة مندفعة *(Pulse - Burst Modulation)*

يستخدم هذا النظام فى الافران *(ovens, furnaces)* والسخانات اللولبية *(die heaters)* وماكينات اللحام النقطى *(spot welders)* بدلاً من نظام التحكم فى الزاوية. تسلط موجة التيار ، نبضة مندفعة،كما فى شكل (٩٠-٢) أ على بوابة الثيريزتورات ويحتوى تيار هذه الدائرة على توافقيات ، فمثلاً لوحدة ثلاثية الاوجه (٦٠٠ فولت و ٢٠٠٠ فولت) تتحكم فى افران قدرتها ٢ م . وات وسجلت تيارات التوافقيات والتردد كما فى شكل (٩٠-٢) ب وتؤثر هذه التوافقيات على متممات الوقاية ومحولات التيار وتسبب مرور نبضات تيار عالية فى مسار التعادل لشبكة التوزيع .

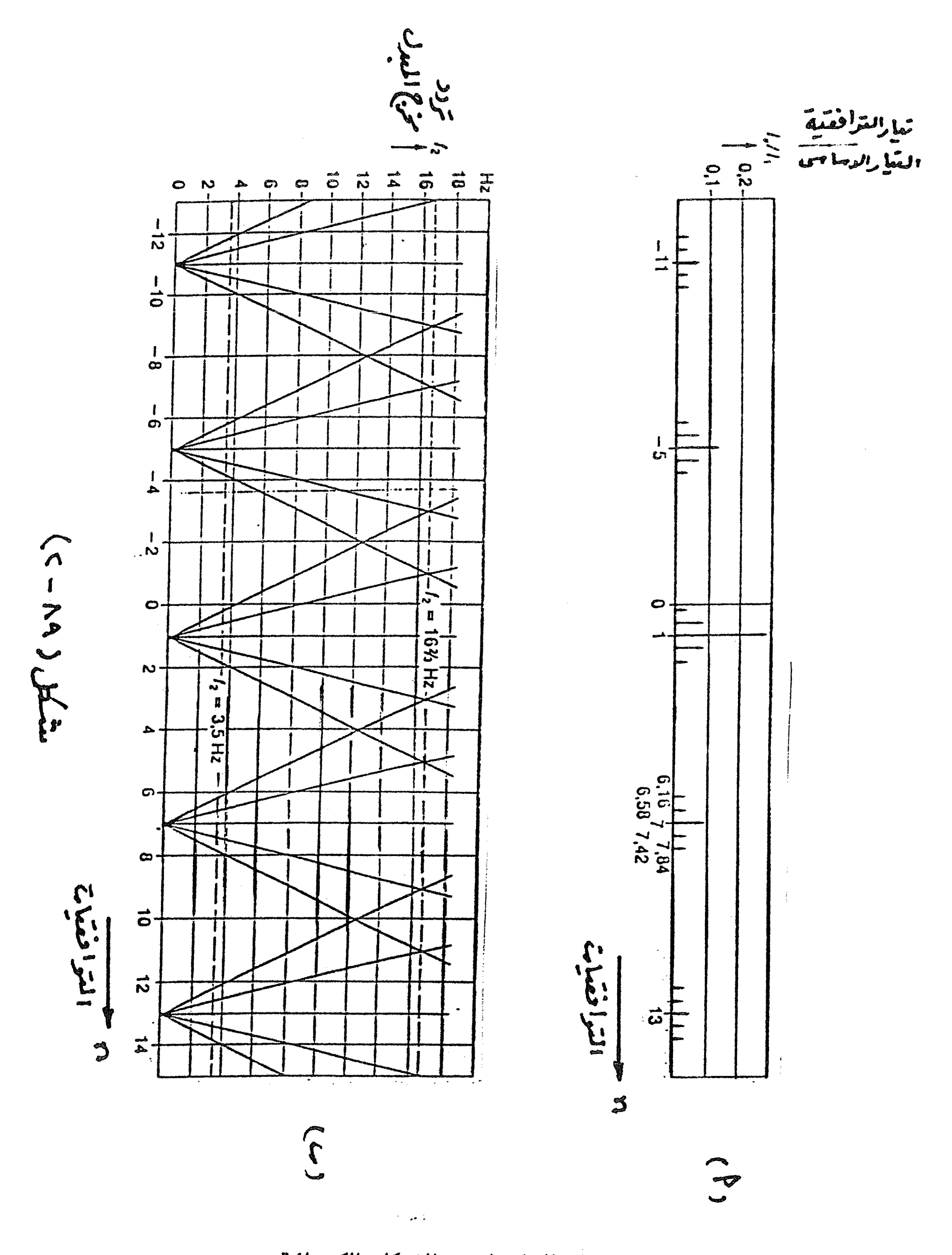


شكل (٨٧-٢)

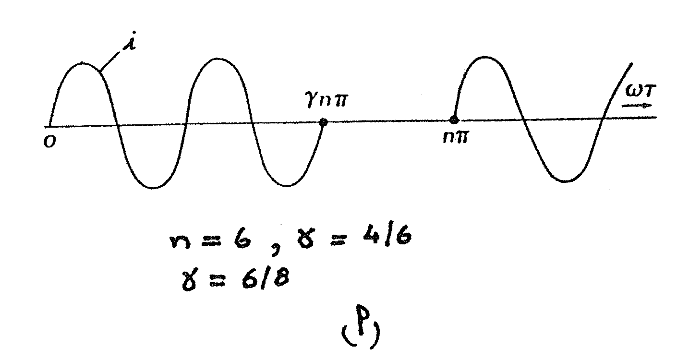


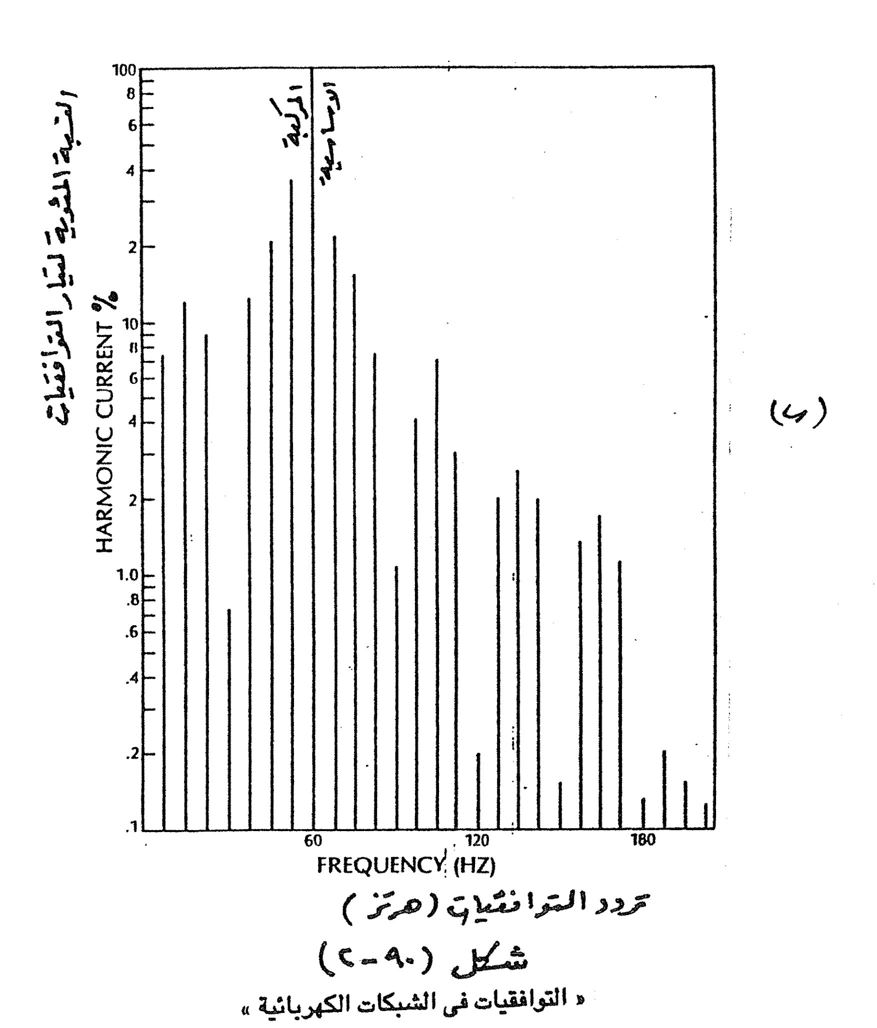
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

شكل (٨٨-٢)


تيار التوافقية / التيار الاساسي
I/I1
0.1
0.2
6.16
6.58
7
7,42
7,84
13
-11
-5
0
1
التوافقيات
n
(أ)
تردد مرجع الحمل
f2
Hz
f2 = 16⅔ Hz
f2 = 3,5 Hz
التوافقيات
n
(ب)

شكل (٨٩ - ٢)





شكل (٩٠-٢)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

الباب الثالث

تأثير التوافقيات

Effect of Harmonics

على مدى اكثر من ٥٠ عاماً ، تم تسجيل وتحليل ومناقشة التوافقيات المسببة للمشاكل فى الشبكات الكهربائية وشبكات الاتصالات وتأثيرها ، وقد تلاحظت التأثيرات التالية :

١ – انصهار مصهرات مكثفات القدرة او حدوث انهيار لعزل المكثفات .

٢ – مفقودات عالية وسخونة فى الآلات المتزامنة والتأثيرية .

٣ – ارتفاع فى الجهد وزيادة فى الحمل نتيجة رنين جهود او تيارات التوافقيات بالشبكة الكهربائية .

٤ – انهيار عزل الكابلات نتيجة توافقيات الجهود المرتفعة فى النظام .

٥ – التداخل بالتأثير مع نظم الاتصالات عن بعد .

٦ – اخطاء فى قراءات عدادات الكيلوات ساعة التأثيرية .

٧ – حدوث تداخل فى الاشارات والفصل الخاطئ لمتممات الوقاية خاصة التى تعمل بنظم التحكم بالميكروبروسيسور *(Microprocessor controlled)* وايضاً بالنظم المحتوية على عناصر استاتيكية *(Solid state)* .

٨ – حدوث تداخل مع اجهزة تحكم المحركات الكبيرة *(motor controllers)* ومع نظم الاثارة *(excitation)* بمحطات التوليد .

٩ – حدوث اهتزازات ميكانيكية بالآلات المتزامنة والتأثيرية .

١٠ – التشغيل غير المستقر *(unstable)* لدوائر الاشتعال *(Firing circuit)* المستخدمة فى كاشف التقاطع الصفرى لموجة الجهد *(Zero voltage crossing detector)*

عموماً يصنف تأثير التوافقيات الى قسمين هما :

التأثير على الشبكة الكهربائية – والتداخل مع دوائر الاتصالات .

اولاً - تأثير التوافقيات على مكونات الشبكة الكهربائية

تتمثل التأثيرات الرئيسية لتوافقيات التيار والجهد على الشبكات الكهربائية فى :

- نتيجة رنين التوازى والتوالى *(Series and parallel resonances)* يحدث تكبير لمستويات التوافقيات .
- تقل كفاءة توليد ونقل واستخدام القدرة .
- انهيار العزل فى المعدات الكهربائية .
- التشغيل الخاطئ للمعدات .

ويحدث الرنين فقط عند تردد محدد لمصدر الطاقة وهو تردد رنين الدائرة وتوجد حالتين للرنين : رنين الجهد او رنين التوالى *(Voltage or series resonance)* ، ورنين التيار او رنين التوازى *(Current or parallel resonance)* .

يوضح شكل (١-٣) أ الدائرة المكافئة لدائرة رنين الجهد او التوالى والتى تتكون من العناصر R,L,C والمتصلة على التوالى مع مصدر التغذية ، وتعتمد قيم ممانعة الملف X_L وممانعة المكثف X_c على التردد الزاوى ω ، اى ان

$$X_L = \omega L \qquad , \qquad X_c = \frac{1}{\omega c}$$

عند رنين الجهد يتحقق الآتى

$$X_L = X_c \qquad , \qquad \omega = \omega_s$$

او

$$\omega_s L = \frac{1}{\omega_s c}$$

$$\therefore \text{التردد الزاوى للرنين} = \omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{تردد الرنين} = f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ويمكن حدوث الرنين للدائرة بطريقتين مختلفتين هما :

إما تغيير قيم C,L (احداهما او الاثنين معاً) عند ثبوت تردد المصدر .

او تغيير قيمة تردد المصدر عند ثبوت قيم C,L

نلاحظ منحنى العلاقة بين (ω,Xc) , (ω, X_L) من شكل (١-٣) ب وعند تساوى X_c , X_L تصبح $Z = R$, $\omega = \omega_s$ ، بينما عندما $\omega < \omega_s$ تتغلب قيمة X_c مؤدية الى زيادة المعاوقة مصحوبة بانخفاض التردد .

وعندما $\omega > \omega_s$ ، تتغلب قيمة X_c مؤدية الى زيادة المعاوقة مصحوبة بزيادة فى التردد ويوضح شكل (١-٣) جـ منحنيات رنين الجهد .

وبنفس التتابع يوضح شكل (٢-٣) مكونات دائرة رنين التيار او التوازى ومنحنى العلاقة بين مقلوب المعاوقة *(Susceptance)* ويرمز لها $y = 1/Z$ والتردد الزاوى ω كذلك العلاقة بين التيارات I , I_L , I_c مع التردد الزاوى ω .

وتتحقق حالة الرنين للدائرة عندما

$$y_L = \frac{1}{\omega L} \quad , \quad y_c = \omega c \quad , \quad \omega = \omega_p$$

او

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

وتحدث ببساطة نفس الحالتين السابقتين فى الشبكات الكهربائية فمثلاً تبعاً لطريقة توصيل مكثفات القدرة فى الشبكة تحدد ماذا كان الرنين توالى او توازى .

وفيما يلى توضيح للحالتين فى الشبكات الكهربائية .

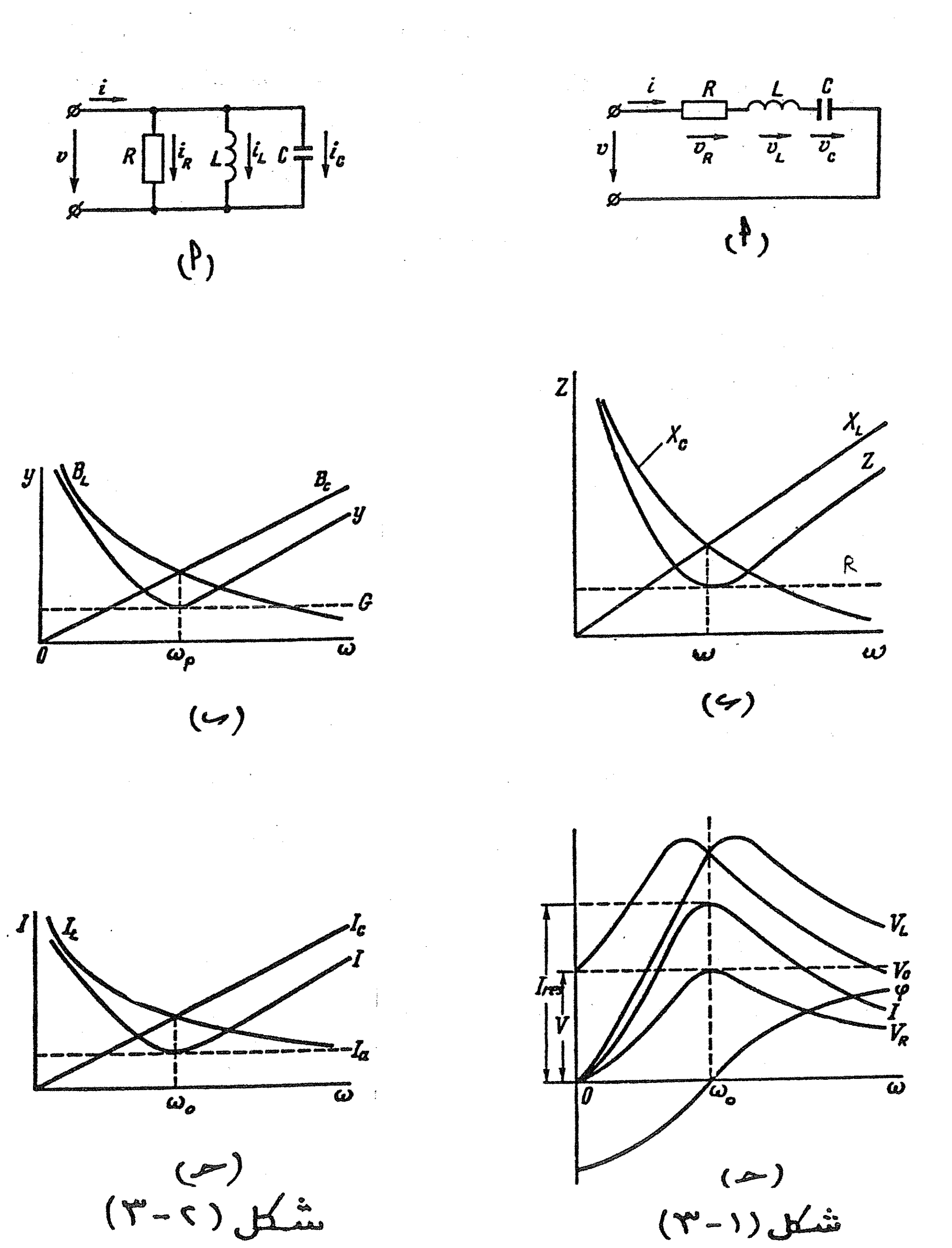
رنين التوازى *(Parallel resonance)*

يمثل رنين التوازى ، نتيجة المعاوقة العالية ، مصدراً للتوافقيات عند تردد الرنين .

يحدث رنين التوازى بطرق مختلفة ابسطها عند توصيل مكثفات على نفس قضبان مصدر التوافقيات وفى هذه الحالة يكون رنين التوازى بين المصدر والمكثف ويوضح شكل (٣-٣) اماكن مختلفة لتركيب مكثفات على التوازى .

وبفرض ان : p_s مقنن دائرة القصر للمصدر *(MVA)* .

P_c مقنن المكثف *(MVAr)*



i
R
L
C
v
v_R
v_L
v_C
(أ)
i_R
i_L
i_C
(أ)
Z
X_C
X_L
R
ω
(ب)
y
B_L
B_C
G
0
ω_p
(ب)
V_L
V_0
φ
I
V_R
I_{res}
V
ω_0
(حـ)
I
I_L
I_C
I_a
ω_o
(حـ)

شكل (١ - ٣)

شكل (٢ - ٣)

f= التردد الاساسى للمصدر (هرتز)

f_p= تردد رنين التوازى (هرتز)

فان معادلة تردد رنين التوازى تكون

$$f_p = f\sqrt{\frac{P_s}{P_c}}$$

فى الشكل (٤-٣) تم تمثيل جزء من شبكة كهربائية تحتوى على مصدر توافقيات بدائرة رنين توازى وتكون ممانعة الشبكة عند التردد n هى

$$X_{sn} = \frac{nE^2}{P_s}$$

وتكون ممانعة المكثف عند التردد n هى

$$X_{cn} = \frac{E^2}{nP_c}$$

ولايجاد حالة الرنين بشبكة معينة يجب اخذ قياسات لتيارات التوافقيات لكل حمل للمشتركين وللمصدر مع قياسات جهد التوافقية عند القضبان . وعلى العموم ، اذا كان التيار المار الى المصدر من القضبان صغيراً وجهد التوافقيات عالياً ، فهذا لايشير الى رنين فى شبكة المصدر .

بينما اذا كان تيار التوافقيات المار فى الاحمال A كبيراً ومتقدماً *(Lead)* على جهد التوافقيات عند القضبان ، فهذا يشير الى رنين محاثة المصدر وسعوية الحمل .

ويوضح شكل (٥-٣) مثالاً آخراً لرنين التوازى والدائرة المكافئة له .

وبتقسيم تيار التوافقيات i_n بين المصدر والمكثف اي ان

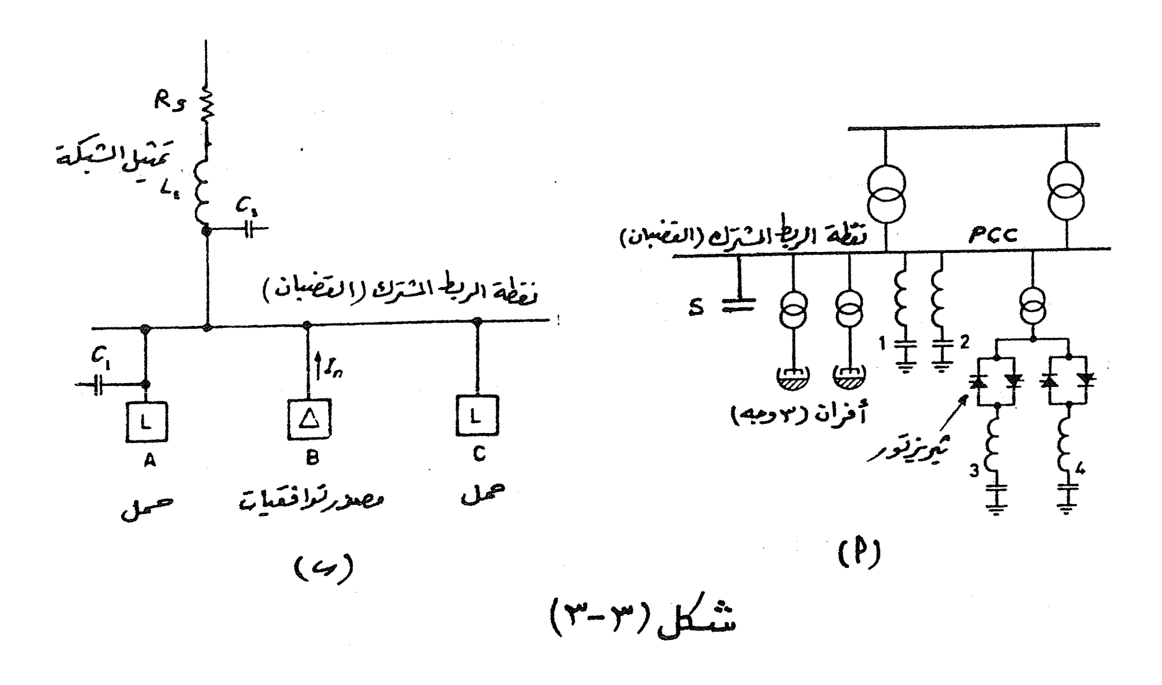
$$i_n = i_{sn} + i_{fn}$$

تيار التوافقيات بالمصدر = $i_{sn} = \dfrac{Z_f}{Z_f + Z_s}\, i_n = \rho_s\, i_n$

تيار التوافقيات بالمكثف = $i_{fn} = \dfrac{Z_s}{Z_f + Z_s}\, i_n = \rho_f\, i_n$

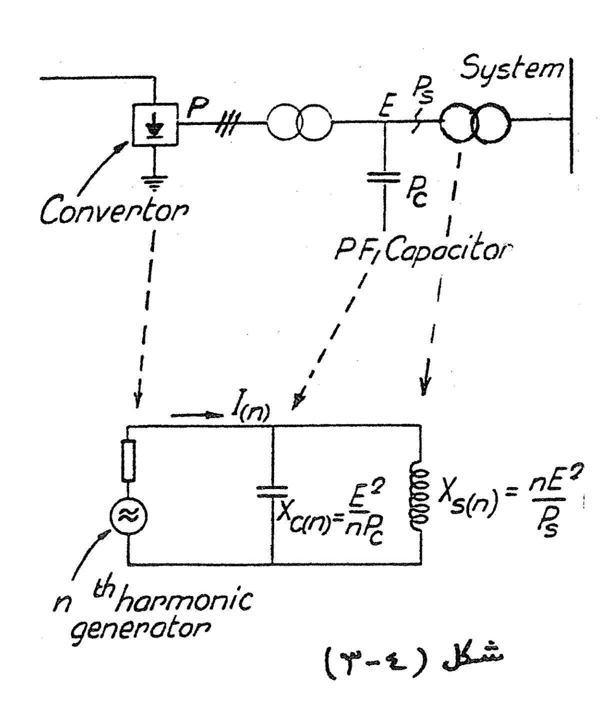
حيث : ρ عامل التوزيع *(Distribution Factor)*

وبفرض ان :



Rs
تمثيل الشبكة
Ls
Cs
نقطة الربط المشترك (القضبان)
C1
In
L
A
حمل
B
مصدر توافقيات
L
C
حمل
(ب)
نقطة الربط المشترك (القضبان)
PCC
S
1
2
أفران (٣ وجه)
ثيرزيتور
3
4
(أ)

شكل (٣-٣)



System
P
E
Ps
Pc
Convertor
PF Capacitor
I(n)
Xc(n)= E²/nPc
Xs(n) = nE²/Ps
nth harmonic generator

شكل (٤-٣)

$E =$ جهد القضبان $= 13.8\ kv$

$P_s =$ مستوى قصر الدائرة $= 479\ MVA$

$P_c =$ قدرة المكثف $= 19.04\ MVAr$

$\frac{X_s}{R_s} = 10$ للشبكة

ونحصل على معاملات الدائرة كالآتى :

$$X = \frac{kV^2}{MVA_{\ s.c}}$$

وتكون ممانعة الشبكة عند التوافقية n

$$X_s = \frac{n\ kV^2}{MVA_{\ s.c}} = \frac{n\ (13.8)^2}{476} = 0.4\ n$$

وتكون ممانعة المكثف عند التوافقية n

$$X_{fc} = \frac{(13.8)^2}{19.04\ n} = \frac{10}{n}$$

$$R_s = \frac{X_s}{10} = 0.04\ n$$

وفى الشكل (٥-٣) ب بفرض عدم وجود مفاعلة التوليف *(tuning reactor)* فان

$$X_f = X_{fc}$$

$$\rho_f = \frac{0.04 + j\,0.4}{0.04 + j\,(0.4 - \frac{10}{n^2})}$$

$$\rho_s = \frac{-j\ 10/n}{(0.04 + j\,0.4)\,n - j\,10/n}$$

ولورسمنا العلاقة بين كل من ρ_s , ρ_f مع درجة التوافقيات n نحصل على شكل (٦-٣) أ ، ومنه نجد ان رنين التوازى بين المكثف والمصدر عند التوافقية الخامسة $(n=5)$ ، [اى عندما $\rho_s \simeq \rho_f$] .

واذا اضيفت ممانعة ملف التوليف (X_{fl}) (وهى حالة مرشح للتوافقية الخامسة) فان

$$X_{fl} = \frac{X_{fc}}{n} = \frac{10}{n^2} = \frac{10}{25} = 0.4\,\Omega$$

وفى حالة اضافة X_{fl} لمعادلتى ρ_f ، ρ_s يمكن رسم العلاقة مع درجة التوافقية n كما فى شكل (٦-٣) ب ويلاحظ ان $\rho_f = 1$ عند $n=5$ ويتغير موضع رنين التـوازى الى حوالى $n = 3.5$.

ويوضح شكل (٧-٣) أ مثالاً اكثر تعقيداً لجزء من الشبكة الكهربائية يغذى بمصدر للتوافقيات على القضبان رقم ١ ، وتكون تيارات التوافقيات هى i_{c1n} فى المكثف رقم ١ و i_{c2n} فى المكثف رقم ٢ وبالتالى يوجد عاملين توزيع هما ρ_{f2} ، ρ_{f1} وبتسجيل العلاقة بين ρ_{f1} ، ρ_{f2} مع التردد (هرتز) كما فى شكل (٧-٣) ب نجد اختلاف هذه المنحنيات اذا تم عزل اى من المكثفين .

رنين التوالى (*Series resonance*)

فى شكل (٨-٣) تم توصيل مكثف على التوازى مع حمل ، وعند الترددات العالية يهمل الحمل وتقل قيمة المعاوقة السعوية ، عندئذ يحدث رنين التوالى

تبعاً للمعادلة :

$$f_s = f\sqrt{\frac{P_t}{P_c Z_t} - \frac{P_l^2}{P_c^{\,2}}}$$

حيث : f_s تردد رنين التوالى (HZ)

p_t قدرة المحول

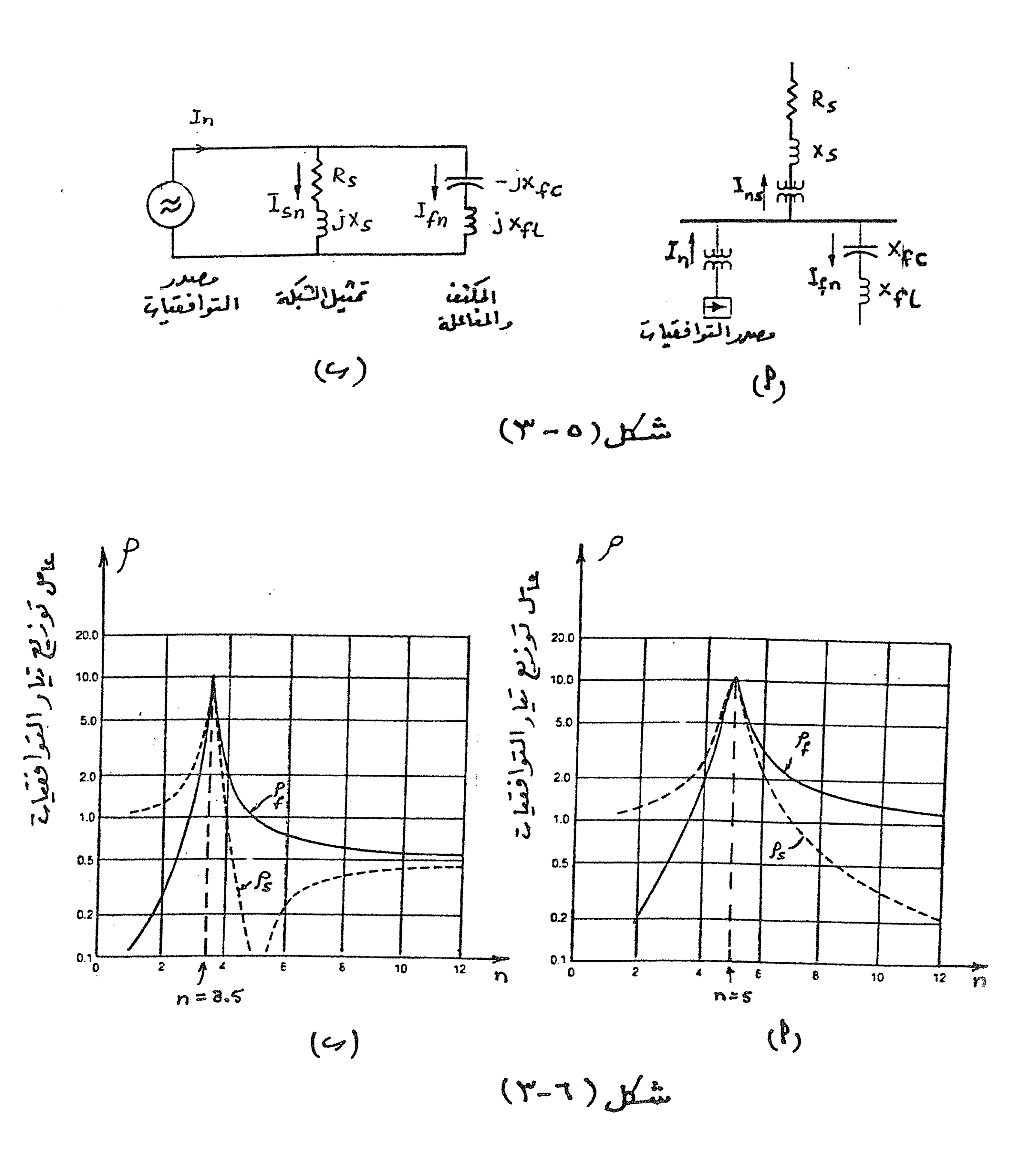
Z_t معاوقة المحول $(p.u)$

P_l قدرة الحمل (مقاومة)

ونتيجة لذلك تمر تيارات عالية بالمكثف عند حدوث توافقيات فى الجهد صغيرة نسبياً.

وعموماً اذا حدث رنين فانه يؤدى الى :

- سخونة زائدة على المكثفات تؤدى الى انهيارها
- سخونة مصهرات المكثفات ثم انفجارها .
- زيادة اجهادات الجهد على المكثف .

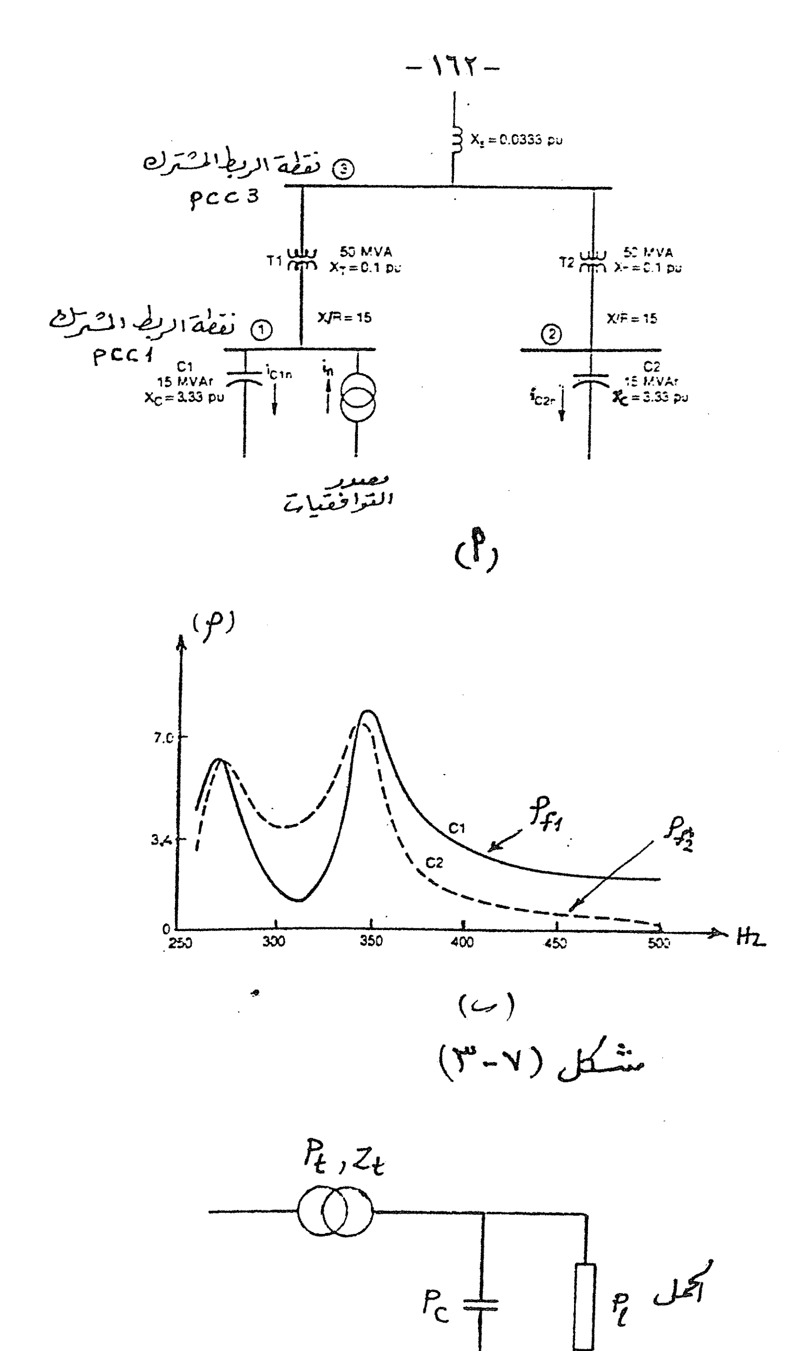


I_n
R_s
I_{sn}
jX_s
$-jX_{fc}$
I_{fn}
jX_{fL}
مصدر التوافقيات
تمثيل الشبكة
المكثف والمفاعلة
(ب)
R_s
X_s
I_{ns}
I_n
X_{fc}
I_{fn}
X_{fL}
مصدر التوافقيات
(أ)

شكل (٥-٣)

ρ
معامل توزيع تيار التوافقيات
ρ_f
ρ_s
n = 3.5
n = 5
n
(ب)
(أ)

شكل (٦-٣)



X_s = 0.0333 pu
③ نقطة الربط المشترك
PCC3
T1 50 MVA
X_T = 0.1 pu
X/R = 15
T2 50 MVA
X_T = 0.1 pu
X/R = 15
① نقطة الربط المشترك
PCC1
②
C1
15 MVAr
X_C = 3.33 pu
i_{C1n}
i_n
C2
15 MVAr
X_C = 3.33 pu
i_{C2n}
مصدر التوافقيات
(أ)
(م)
7.0
3.4
0
250
300
350
400
450
500
Hz
C1
C2
P_{f1}
P_{f2}
(ب)
P_t , Z_t
P_C
P_l
الحمل

شكل (٣-٧)

شكل (٣-٨)

١ - تأثير التوافقيات على الآلات الدوارة

تحدث تيارات التوافقيات سخونة زائدة على الالات الدوارة خاصة المولدات المتزامنة ذات الاقطاب غير البارزة *(nonsalient-pole)* وتنتج تيارات التوافقيات قوة دافعة مغناطيسية *(magnetomotive force)* تسبب مرور التيارات فى سطح الاقطاب وفى النهاية تحدث سخونة زائدة . ويدور العضو الدوار *(rotor)* فى الاتجاه الامامى نتيجة حدوث درجات التوافقيات ٦ ، ١٢ ، ... الحادثة من توافقيات التتابعية الموجبة وهى : ٧ ، ١٣ ، .... ، بينما التوافقيات نتيجة التتابعية السالبة وهى ٥ ، ١١ ،... تحدث دوران للعضو الدوار فى الاتجاه المضاد وتنتج مرة اخرى درجات التوافقيات ٦ ، ١٢ ، .... وتكون المحصلة النهائية حدوث مجال مغناطيسى نابض *(pulsating)* يؤدى الى حدوث سخونة فى بعض المواضع على العضو الدوار .

يكون التأثير على المحركات التأثيرية اقل من المولدات المتزامنة ذات الاقطاب غير البارزة . عموماً تحدث تيارات التوافقيات الزائدة سخونة على المحركات التأثيرية خاصة عندما تكون متصلة بشبكة تحتوى على مكثفات تحدث رنين .

كذلك تحدث توافقيات الجهد او التيار زيادة فى مفقودات كل من ملفات العضو الثابت *(Stator)* ، ودائرة العضو الدوار ، وشرائح القلب للعضوين . وتكون مفقودات ملفات العضو الثابت والعضو الدوار كبيرة نتيجة التيارات الاعصارية *(eddy currents)* والظاهرة السطحية *(skin effect)* .

كما تنتج مفقودات اضافية نتيجة مجالات التسرب الحادثة من مرور تيارات التوافقيات فى نهايات الملفات للعضو الثابت والمتحرك .

وفى المحركات التأثيرية ذات العضو الدوار المتخالف *(Skewed rotors)* [قطرة غير موازى لمحور الدوران] يتغير الفيض فى كل من العضو الدوار والعضو الثابت وتنتج من الترددات العالية مفقودات جديدة تعتمد قيمتها على الفيض المتخالف وعلى خاصية فقد الحديد للشرائح تودى فى النهاية الي حدوث سخونة زائدة فى المحركات .

وتخضع مفقودات النحاس W_c للمعادلة الآتية :

$$W_c = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 R_n$$

حيث :

I_n أقصى قيمة لتيار التوافقية من الدرجة n

R_n مقاومة الملفات عند التوافقية n

وتخضع مفقودات التخلفية *(Hysteresis losses)* W_h تبعاً للمعادلة الآتية :

$$W_h = K_1 B_{\max}^{x} f \qquad watts / lb$$

حيث :

k_1 = ثابت يعتمد على المادة الحديدية المستخدمة

B_{max} = اقصى كثافة فيض *(Flux density)*

x = ثابت (ويؤخذ عادة ١,٦)

f = التردد الاساسى (٥٠ هرتز او ٦٠ هرتز)

بينما تعرف مفقودات التيارات الاعصارية *(Eddy-current losses)* W_e من المعادلة الآتية :

$$W_e = K_2 b^2 B_{max} f^2 \qquad watts / lb$$

حيث :

k_2 = ثابت يعتمد على نوع المادة الحديدية المستخدمة

b = سمك الشرائح

تؤثر توافقيات التيار الموجودة فى العضو الثابت للآلات الترددية *(a.c)* على الحركة (اى تتغير قيمة انزلاق التوافقية الموجبة S_n) ، وتؤدى الى زيادة عزم عمود الدوران فى نفس اتجاه سرعة مجال التوافقيات ، وعلى ذلك فأن جميع توافقيات التتابعية الموجبة تحدث عزم دوران فى اتجاه عزم عمود الدوران بينما تحدث توافقيات التتابعية السالبة تأثيراً فى الاتجاه المضاد .

ويوضح شكل (٩-٣)أ الدائرة المكافئة للآلة الحاثية عند التوافقية n لكل وجه .

ومن تيار التوافقية I_n نحسب العزم لكل وجه عند السرعة التوافقية من المعادلة

$$T_n = I_n^{\,2} \left(\frac{r'_{2n}}{S_n} \right) \qquad watts$$

فاذا نسبنا العزم T_n الى التوافقية الاساسية تصبح المعادلة :

$$T_n = \frac{I_n^{\,2}}{n} \left(\frac{r'_{2n}}{s_n} \right) \qquad watts$$

وتبين اشارة n اتجاه العزم

كما أن s_n تساوى الوحدة تقريباً وعلى ذلك تصبح المعادلة السابقة

$$T_n = \frac{I_n^{\,2}}{n}\, r'_{2n} \qquad p.u$$

(حيث I_n , r'_{2n} بوحدات $p.u$)

[يعرف الانزلاق $(slip)$ من المعادلة $s= \frac{N_s - N}{N_s}$ حيث N_s هى السرعة التزامنية وتساوى $\frac{60\ f}{p}$ حيث N سرعة المحرك ، f التردد ، $2p$ عدد اقطاب الآلة]

وبالتعويض فى المعادلة السابقة بالقيم

$$n \text{ جهد التوافقية} = V_n = I_n\ Z_n \quad , \qquad Z_n \simeq n\, X_1$$

فاننا نحصل على معادلة العزم T_n بدلالة جهد التوافقية V_n كالآتى :

$$T_n = \left(\frac{V_n^{\,2}}{n^3} \right) \left(\frac{r'_{2n}}{X_1^{\,2}} \right)$$

ويوضح شكل (٩-٣) ب العلاقة بين عزم وتيار التوافقية n وسرعة العضو الدوار ويلاحظ ان تأثير التوافقيات التتابعية الموجبة (n تساوى ١ ، ٤ ، ٧ ....) كما فى شكل (١٠-٣) أ تؤدى الى :

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى العضو الثابت بسرعة تساوى $n\omega$ فى الاتجاه الموجب للدوران .

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى العضو الدوار بسرعة تساوى $(1-n)\omega$ للآلات المتزامنة بينما يدور بسرعة تساوى $\omega\ (n-1+s)$ فى الآلات الحاثية .

- يكون العزم فى اتجاه الدوران .

بينما يؤدى تأثير توافقيات التتابعية السالبة (n تساوى ٢ ، ٥ ، ٨ ....) ، كما فى شكل(١٠-٣) ب الى :

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى عكس اتجاه الدوران اى بسرعة تساوى $n\omega$-

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى العضو الدوار بسرعة تساوى $(n+1)\omega$- للآلات المتزامنة بينما يدور بسرعة $(n+1-s)\omega$- للآلات الحاثية .

- يكون العزم فى عكس اتجاه الدوران .

ويلاحظ ان توافقيات التتابعية الصفرية (n تساوى ٣ ، ٦ ، ٩ ...) لاتحدث كثافة فيض مغناطيسى ، ويتركز تأثيرها فى إحداث مفقودات مقاومة أومية (*Ohmic losses*)

٢ - تأثير التوافقيات على المعدات الاستاتيكية للقدرة

سنتعرض فى هذا الجزء لتأثير التوافقيات على خطوط النقل والمحولات والمكثفات .

أ - تأثير التوافقيات على خطوط النقل الكهربى

يوجد تأثيران لمرور تيارات التوافقيات بالشبكة هما :

١ - يؤدى مرور تيارات التوافقية الى زيادة مفقودات الخط تبعاً للمعادلة :

$$W_c = \sum_{n=2}^{k} I_n^{\,2} R_n$$

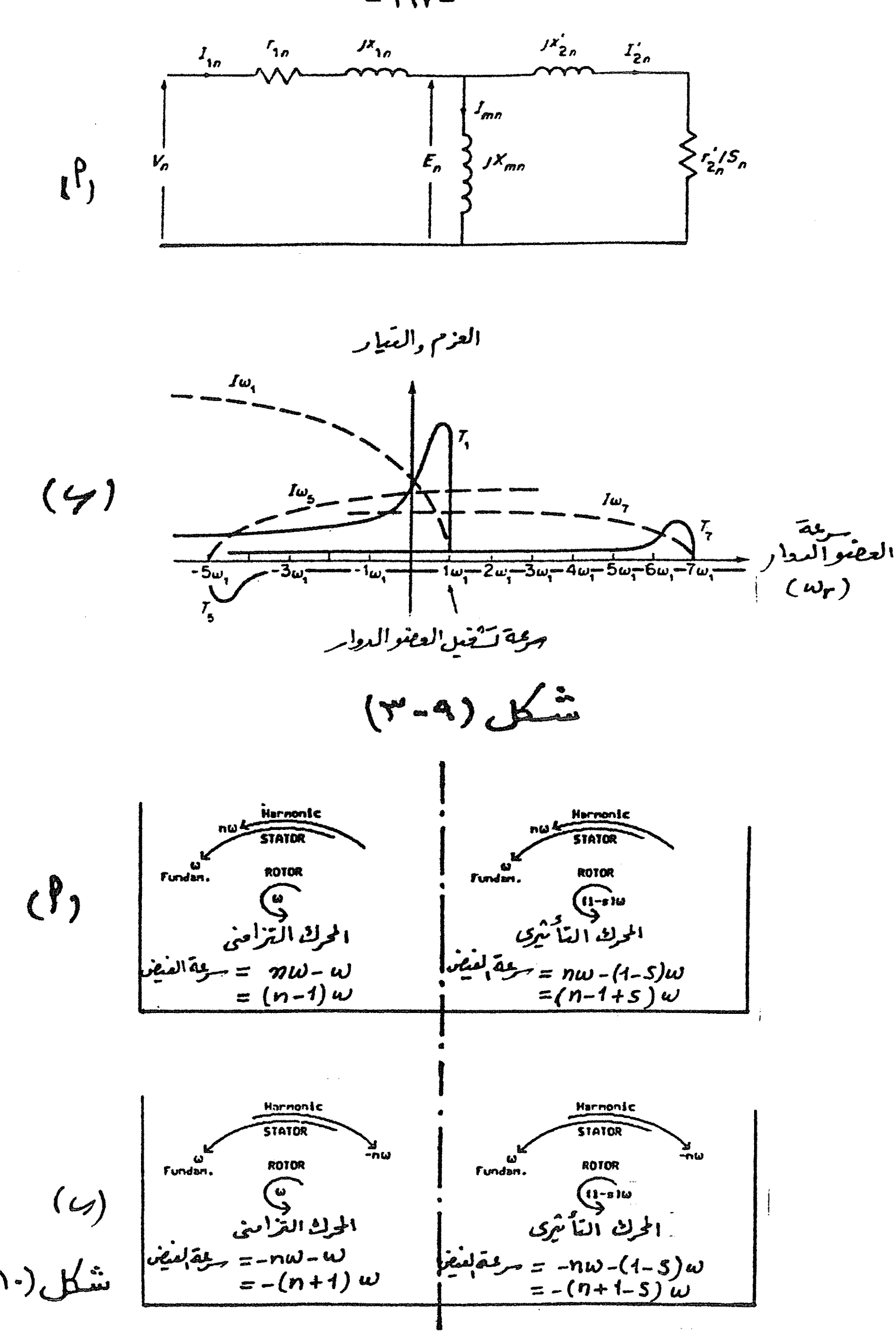
حيث :

I_n : قيمة جذر متوسط المربعات (*rms*) لتيار التوافقية n

R_n : مقاومة الخط عند تردد التوافقية n

٢ - يحدث مرور تيارات التوافقيات هبوط فى جهد التوافقيات خلال المعاوقات المختلفة للشبكة .

وعلى ذلك نجد ان اضطرابات الجهود تزداد فى الشبكات ذات مستوى القصر المنخفض والمعاوقات الكبيرة بينما تقل فى الشبكات ذات مستوى القصر العالى والمعاوقات صغيرة القيمة .



شكل (٩-٣)

شكل (١٠-٣)

أما فى حالة الكابلات فان توافقيات الجهد (ذات الترددات العالية) تزيد من اجهادات العزل والتى تؤدى الى تقليل العمر الافتراضى للكابل وزيادة عدد الاعطال وبالتالى زيادة تكاليف الاصلاح (عادة يصمم عزل الكابلات ليتحمل مستويات الجهود العالية)

عموماً فان ظهور توافقيات التيار فى الخطوط تعمل على زيادة التحميل وبالتالى سخونة الموصلات ، وتمر التوافقيات الثلاثية الفردية للتيار (٣ ، ٩ ، ١٥ ..) فى مسار التعادل فى النظام الثلاثى الاوجه - اربعة اسلاك - مؤدية الى سخونة موصل مسار التعادل .

ب – تأثير التوافقيات على محولات القدرة

وجود توافقيات الجهد يزيد من مفقودات التخلفية *(Hysteresis losses)* ومفقودات التيارات الاعصارية *(Eddy current losses)* بالاضافة الى زيادة اجهادات العزل .

وترتفع قيمة مفقودات النحاس *(Copper losses)* نتيجة مرور تيارات التوافقيات وفى محولات القدرة ذات التوصيل Δ تمر تيارات التوافقيات الثلاثية الفردية (٣ ، ٩ ، ١٥ ....) داخل الدلتا مؤدية الى سخونة المحول . (وتستخدم نفس معادلات الفقد المستخدمة فى حالة الآلات الدوارة) .

عموماً جميع هذه المفقودات تؤدى الى سخونة المحول لدرجة حرارة اعلى من الدرجة المفروضة والتى تؤدى الى انهياره وقد يحدث تشبع للقلب ، وفقد فى قدرة المحول وبالتالى انخفاض كفاءته .

جـ – تأثير التوافقيات على مكثفات القدرة

نتيجة وجود توافقيات الجهد يحدث فقد فى قدرة المكثف تبعاً للمعادلة

$$W_c = \sum_{n=1}^{\infty} C\,(\tan \delta)\,\omega_n\,E_n^2$$

حيث :

$\tan \delta = \dfrac{R}{1/\omega c}$ = عامل الفقد

$\omega_n = 2\pi f_n$

$E_n = n$ جذر متوسط مربعات جهد التوافقية

وحيث أن ممانعة (*reactance*) المكثف تتناسب عكسياً مع التردد فان القيم الصغيرة نسبياً لجهود التوافقيات تؤدى الى تشوه ملحوظ فى موجة التيار . ولذا يجب ان تختار قيم المكثفات بحيث لاتتعدى القدرة غير الفعالة للمركبة الاساسية والتوافقيات ١٣٥ ٪ من القيمة المقننة على لوحة البيان (*name plate*) للمكثف .

ويعبر عن احمال *KVAr* للمكثف كجزء من قدرته عند تسلط جهد التوافقيات كالآتى :

$$KVA = E_1^2 + 3\,E_3^2 + 5\,E_5^2 \;......$$

بحيث يتم التعويض عن قيم جهود التوافقيات كنسبة من الجهد المقنن.وفى حالة وجود التوافقية n فقط فان جهد التوافقية E_n يساوى

$$E_n = \sqrt{\frac{1.35 - E_1^2}{n}}$$

ويفضل ان يعبر عن القدرة غير الفعالة الكلية لمجموعة المكثفات (بحيث يؤخذ فى الاعتبار المركبات الاساسية والتوافقيات) بالكمية Q والتى يجب الا تزيد عن القدرة المقننة للمكثفات (*rated reactive power*) اى ان

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$$

عادة يؤخذ فى الاعتبار ، للكميات القياسية للمكثفات ، وجود توافقيات الجهود فى اغلب الشبكات الكهربائية ولذلك فإنها تتعرض لبعض المشاكل البسيطة فقط وتحدث توافقيات التيار بالمكثفات نتيجة تيارات المغنطة لمحولات القدرة .

فاذا كانت المحولات تعمل عند قيم قريبة جداً من الجهود المقننة فان توافقيات الجهد تكون اقل ما يمكن ولاتصدر المكثفات اية توافقيات جهد ، وعادة تكون ترددات التوافقيات الموجودة هى الثالثة والخامسة ، وللمكثف ممانعة صغيرة عند الترددات العالية وبالتالى تسمح بمرور تيارات عالية .

وعموماً يمكن ان تتعرض المكثفات لجهود زائدة وتيارات عالية نتيجة رنين التوالى والتوازى بين المكثفات ومكونات الشبكة الكهربائية ، ويؤدى هذا الى زيادة المفقودات وسخونة المكثفات وبالتالى انهيارها .

٤ - تأثير التوافقيات على أنظمة التحكم التموجى

يستخدم نظام التحكم التموجى (*ripple control*) خلال فترات ذروة الاحمال

اليومية فى :

- التحكم عن بعد فى دوائر اضاءة الشوارع .

- التحكم فى تخفيض الاحمال (مثل التحكم فى تشغيل سخانات المياه)

وذلك للطرازات القديمة من متممات التحكم من النوع الكهرومغناطيسى ، والحديثة من النوع الاستاتيكى . ويغذى ملف المتمم التموجى (ذى معاوقة كبيرة) بالجهد ، وقد يؤدى تداخل التوافقيات بقيمة كافية الى حدوث تشغيل خاطئ *(maloperation)* للمتمم او الى اعطاء اشارة منع *(signal blocking)* .

وتعنى اشارة المنع وجود جهد تداخل يكفى للوصول بالمتمم لعدم استطاعته الكشف عن وجود اشارة التشغيل ، ويمكن ان تحدث المكثفات نفس التأثير تبعاً لقدرتها لامتصاص الاشارات التموجية .

ان وجود جهود التوافقيات يعمل على التشغيل الخاطئ للمتمم (وذلك عند غياب الاشارة الاصلية) اى تتغير حالة تشغيل المتمم ، ولكى نعالج هذه الحالة يستخدم التوصيل ذات الشفرة *(encoded switching Signals)*فى متممات توليد التموجات ، ويضاف للمتمم مرشح رقمى *(digital filter)* لكشف ترددات جهود التوافقيات الغير مرغوبة .

هـ - تأثير التوافقيات على أنظمة الوقاية

تتسبب التوافقيات فى تشوه خصائص التشغيل لمتممات الوقاية تبعاً لنوع المتمم واساسيات تشغيله ، فعلى سبيل المثال يعتبر تشغيل متممات الوقاية الكهرومغناطيسية من الانواع ذات حافظة الجذب *(Attracted armature)* والحافظة المفصلية *(Hinged aramture)* والكباس *(plunger)* والجزء الحديدى المستقطب المتحرك *(Polarized moving iron)* على معادلة القوة الآتية :

$$F = F_0 - F_r$$
$$= K_1 I^2 - K_2$$

حيث :

F_0 = قوة التشغيل والتى تتناسب مع سرعة التيار *(I)*

F_r = قوة الكبح ممثلة فى عملية الاحتكاك

F = القوة المؤثرة

اذ يعتمد ضبط هذه المتممات على قيمة التيار المار بملف المتمم وقت حدوث العطل ولايعتمد الضبط على تردد الشبكة لذلك لايؤثر وجود التوافقيات على هذه الانواع .

بينما نجد فى متممات الوقاية الكهرومغناطيسية ذات القرص التأثيرى *(Induction Disc)* والتى يعتمد تشغيلها على معادلة قوة دوران القرص وهى :

$$F \propto \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta$$

حيث ان Φ_1 , Φ_2 هما المجالان المؤثران على القرص والزاوية بينهما θ ومعادلتهما :

$$\Phi_1 = \Phi \sin \omega t$$

$$\Phi_2 = \Phi \sin (\omega t + \theta)$$

وبذلك تتأثر بوجود التوافقيات ذات الترددات المختلفة ، حيث انها مصممة عند تردد ٥٠ هرتز ، ويكون تأثيرها بالاسراع او التباطئ فى عملها . وتكبر معاوقة المدخل *(Input impedance)* كلما زادت ترددات المتممات ذات القرص التأثيرى التى تغذى بمصدر جهد متردد *a.c* .

اما فى المتممات الرقمية *(Digital relays)* وتبعاً لطريقة الحسابات المستخدمة سواء بالعينات *(sampled)* او بالتقاطع الصفرى *(Zero - crossing)* فان وجود التوافقيات يحدث اخطاء فى الحسابات .

وفى أغلب الحالات ، عموماً ، فان التغير الحادث فى خصائص تشغيل المتمم تكون صغيرة ولاتؤدى الى مشكلة محسوسة . أما اذا كانت مستويات جهود التوافقيات اقل من ٢٠ ٪ فان المتممات لاتتأثر .

وتتأثر متممات الوقاية المسافية بوجود التوافقيات فى الشبكة الكهربائية ، حيث يتم ضبط المتمم على المعاوقة الاساسية للخط اما وجود توافقيات التيار (خاصة التوافقية الثالثة) عند موضع العطل فيعمل على تغيير قيمة المعاوقة المقاسة بالنسبة للقيمة

المضبوطة .

وعند مرور تيار العطل خلال ارضية ذات مقاومية *(resistivity)* كبيرة فان هذا التيار يحتوى على توافقيات عالية مؤدياً الى حدوث تشغيل خاطئ الا اذا تغلبت الموجات الاساسية ، واذا كان العطل متصل مباشرة مع الارض فان المركبات الاساسية للتيار والجهد تكون هى الغالبة وحيث ان محولات التيار يحدث لها تشبع فيحدث التشوة لموجة التيار الثانوى خاصة لوجود مركبة التيار المستمر *(d.c offset)* فى موجة التيار الابتدائى . وعلى ذلك فوجود التوافقيات فى موجة التيار الثانوى تعتبر مشكلة حقيقية حيث عند حدوث تشبع لمحولات التيار فانه من الصعب معرفة الموجة الاساسية للتيار .

وفى حالة الاستقرار *(Steady state)* نجد ان القوة الدافعة الكهربائية *(emf)* العالية فى الملف الثانوى ذى معاوقة الاثارة غير الخطية لمحول التيار تؤدى الى وجود التوافقيات الفردية فقط . بينما فى الحالات العابرة *(Transients)* مع حدوث تشبع لمحول التيار تحدث توافقيات لأية درجات وتكون التوافقيات الغالبة هى الثانية والثالثة .

ترشح موجات التيار والجهد المغذية بمتممات الوقاية الرقمية ويزداد الاهتمام وبعناية فائقة بمتممات الوقاية المسافية الرقمية .

وعلى الرغم من وجود التوافقيات فى حالات التشغيل العادية فانها لاتسبب اى مشكلات لمتممات الوقاية الا الحالة التى يتم فيها ادخال محول قدرة على الشبكة الكهربائية حيث يحتوى تيار المغنطة الاندفاعى *(magnetizing inrush current)* على توافقيات عالية ، مما يحدو بنا الى استخدام متممات وقاية حديثة مزودة بعنصر منع التوافقيات او باستخدام تأخير زمنى محدد *(Time delayed)* لمتمم الوقاية التفاضلية وهذا لايفضل استخدامه حتى لايتعرض المحول لمخاطر الانهيار اذا صادف وجود عطل على المحول اثناء مرور تيار المغنطة الاندفاعى (اى لحظة توصيل المحول) .

وتعتمد قيمة الذروة لتيار المغنطة الاندفاعى بالمحول على :

١ - محاثة *(inductance)* الثغرة الهوائية للقلب *(air - core)*

٢ - مقاومة الملف *(winding resistance)*

٣ - لحظة التوصيل على موجة الجهد .

٤ - قيمة الفيض المتبقى *(residual flux)* فى القلب قبل عملية التوصيل .

و - تأثير التوافقيات على بعض الاجهزة المكتبية والمنزلية :

١ - التليفزيونات *(Television)*

تحدث التوافقيات المؤثرة عند القيمة القصوى للجهد تغيير فى حجم واضاءة صورة التليفزيون .

٢ - الاضاءة بالفلورسنت والقوس الزئبقى *(Fluorescent and mercury arc lighting)*

احياناً يضاف مكثف مع ملف كابح التيار *(Ballast)* وتحدث حالة رنين بين المكثف ومحاثة ملف كابح التيار والدائرة المغذية ، وفى حالة وجود التوافقيات يحدث سخونة زائدة وانهيار .

٣ - الاجهزة المحتوية على مبدلات *(convertors)*

يؤثر تشوه موجة الجهد الحادث من تيار التوحيد فى تزامن *(Synchronizing)* الاجهزة الاخرى المحتوية على مبدلات او اية معدات تحكم اخرى متصلة بها .

٤ - معدات تغيير السرعة بالتحكم فى تشغيل الثيريزتور

تؤثر التوافقيات فى هذه المعدات كالآتى :

- تشوه الجهد (بسبب انخفاض فى جهد المصدر) يسبب تشغيل خاطئ خلال فترات عدم اشتغال الثيريزتور .
- تحدث تشوهات الجهد اشعال للثيريزتور فى لحظات غير مرغوبة .
- يؤثر الرنين بين الاجهزة المختلفة عند الجهود المرتفعة .

٥ - الحاسب الآلى *(Computer)*

يصمم الحاسب الآلى بحيث يتحمل وجود التوافقيات المسموحة بالشبكات الكهربائية .

٦ - تكون بعض المعدات غير منتجة للتوافقيات ولكن لسوء الحظ تكون متصلة على مصدر تغذية مع مشتركين اخرين منتجين للتوافقيات وعندئذ تتأثر بالتوافقيات التى تسبب السخونة والانهيار احياناً .

س - تأثير التوافقيات على أجهزة قياس القدرة

تكون معايرة اجهزة القياس بتيار متردد جيبى نقى لذا عند تغذيتها من مصدر تيار مشوه فان قياساتها تحتوى على نسبة خطأ .

وتعتمد اشارة خطأ العداد على قيمة واتجاه سريان قدرة التوافقية .

وقد وجد ان الخطأ الراجع الى تيار التوافقيات يتغير تغييراً كبيراً تبعاً لنوع العداد مع احتمال ان تكون اشارة الخطأ سالبة او موجبة .

ومن انواع أجهزة قياس القدرة الاجهزة الكهرومغناطيسية التى تحدث فيض فرملى *(braking flux)* وفيض دفع *(driving flux)* يكونان بدورهما عزم العضو الدوار . وتجهز عناصر انتاج الفيض الثانوى بمعوضات لتحسين درجة الدقة *(accuracy)* لتعويض الكسور فى مسجل العداد . وتكون هذه العناصر المحدثة للفيض ، والتى تحدث العزم الثانوى والابتدائي ، لها خاصية غير خطية للقيمة والتردد .

اما العناصر غير الخطية فهى عناصر التيار والجهد (ملفى التيار والجهد) والمفرغ المغناطيسى لزيادة الحمل *(over loaded magnatic shunt)* وعنصر حساسية التردد والقرص ومسار التعامد *(quadrature)* ومسار مقاومة الاحتكاك *(anti - friction)* .

تكون استجابة العداد غير كافية عند الترددات المختلفة عن تردد التصميم وعندئذ تصبح عديمة الدقة . وتكون القدرة الكلية للعداد تبعاً للمعادلة

$$P_l = P_{dc} + P_t + P_h$$
$$= V_{dc} I_{dc} + V_t I_t \cos \Phi t + V_h I_h \cos \Phi_h$$

ولايقيس العداد مركبة قدرة التيار المستمر P_{dc} ولكن حساسيته تشعر بوجودها ويقيس p_t بدقة بينما يقيس p_h بلا دقة ، ونحصل على الخطأ عن طريق التردد. ووجود اى قدرة $d.c$ من او الى المشتركين تسبب خطأ يتناسب مع نسبة القدرة $\frac{P_{d.c}}{P_t}$ وتعتمد اشارة الخطأ على اتجاه سريان القدرة . وبالمثل اى نقص فى قياس قدرة التوافقيات p_h تسبب خطأ ويمكن تمثيله بالنسبة $\frac{\pm kP_h}{P_t}$ حيث k يعتمد على خاصية تردد الاستجابة للعداد ، وتعتمد اشاره الخطأ ايضاً على اتجاه سريان القدرة .

ولايحدث عزم نتيجة قدرة التيار المستمر او نتيجة وجود توافقيات الجهود والتيار

ولكن تقلل مقدرة العداد على قياس القدرة عند التردد الاساسى . ووجود التيار المستمر يشوه فيض التشغيل ويغير الزيادة فى نفاذية (Permeability) العناصر المغناطيسية. يرتبط الفيض الناتج من تيارات التوافقيات بالفيض الظاهرى عند نفس التردد والتى تحدث نتيجة العجز فى عناصر العداد ويحدث العزم الثانوى، فى عدادات قياس الكيلووات ساعة (kwh) الكهرومغناطيسية يقرأ العداد قيمة اكبر من المفروض عند مستهلك ينتج توافقيات من أجهزة تحكم فى السرعة بواسطة التحكم فى الثيريزتور (خاصة فى وجود التوافقيات الزوجية ومركبة التيار المستمر) مصحوباً بمعامل قدرة منخفض .

يعتمد تشغيل الاحمال المحتوية على مبدلات (convertors) على اساسيات اشعال الثيريزتور (Firing) والذى يسبب زيادة فى قراءة عدادات الكيلوات ساعة بحوالى ٦ ٪ وهى نسبة كبيرة بالنسبة لنقص تيار الاخماد (current damping) خلال فتــرة اللاحمل .

وعلى ذلك فوجود التوافقيات فى شبكة مستهلك تؤدى الى زيادة القدرة المستهلكة الظاهرة وزيادة مفقودات الشبكة الكهربائية .

وتماثل عدادات قياس اقصى طلب (maximum demand) عدادات قياس الكيلووات ساعة من حيث تأثيرها بالتوافقيات ولكن تكون الزيادة فى القراءة اقل ، وتؤخذ قياسات عدادات اقصى طلب خلال فترة زمنية محددة .

تكون العدادات الاستاتيكية (Solid state) أعلى سعرا من العدادات الكهرومغناطيسية ويكون لها المقدرة على قياس القدرة الحقيقية بصرف النظر عن شكل الموجات المقاسة .

ص - تأثير التوافقيات على معامل القدرة

يمكن التعبير عن أية موجة للجهد او التيار بدلالة القيم اللحظية (instantaneous values) للجهد او التيار كالآتى :

$$V = \sum_{1}^{n} \sqrt{2}\, V_n \sin(n\omega t + \alpha_n) + \sum_{1}^{m} \sqrt{2}\, V_m \sin(m\omega t + \alpha_m)$$

$$i = \sum_{1}^{n} \sqrt{2}\, I_n \sin(n\omega t + \alpha_n + \Phi_n) + \sum_{1}^{p} \sqrt{2}\, I_p \sin(p\omega t + \alpha_p)$$

ويعبر عن معامل القدرة *(pf)* من المعادلة

$$p.f = \frac{1/T \int_0^T v\, i\, dt}{V_{rms} I_{rms}}$$

$$= \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \Phi_n}{\{(\sum_1^n V_n^2 + \sum^m V_m^2)\,(\sum_1^n I_n^2 + \sum^p I_p^2)\}^{1/2}}$$

واذا كانت موجة الجهد جيبية فان معامل القدرة *(p.f)* يكون

$$p.f = \frac{V_1 I_1 \cos \Phi_1}{V_1 I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \Phi_1 = \mu \cos \Phi_1$$

حيث :

$\cos \Phi_1$ = عامل الازاحة *(displacement factor)* بين المركبتين الاساسيتين للجهد والتيار (او معامل قدرة زاوية الازاحة)

μ = عامل التشوه لموجة التيار *(current distortion factor)*

ويكون معامل القدرة *(p.f)* مساوياً للوحدة عندما تكون μ تساوى الوحدة وبالتالى لا يمكن ان تكون $\cos \Phi_1$ اكبر من الواحد الصحيح .

وبذلك لا يكون لتعويض او تحسين معامل القدرة اية علاقة بالموجات المشوهه .

وتستخدم معدات ليس لهـا فقد لتعويض معامل القدرة وتـؤدى اقـل قـدرة ظاهريـة *(apparent power)* الى افضل معامل قدرة *(optimum p.f)* ، فمثلاً عند اضافة مكثفات تحسين معامل القدرة بسعة C متصلة على التوازى مع الحمل الذى له جهد V وتياره i تبعاً للمعادلات السابقة ، فان معادلة القدرة الظاهرية *(s)* بدلالة C تكون

$$S = (\sum_1^n V_n^2 + \sum^m V_m^2)^{1/2} \{\sum_1^n (I_n^2 + V_n^2 n^2 \omega^2 C^2 + 2 V_n I_n n\omega C \sin \Phi_n) + \sum^m V_m^2 m^2 \omega^2 C^2 + \sum^p I_p^2\}^{1/2}$$

وبتفاضل المعادلة السابقة بالنسبة للسعة C ثم مساوتها بالصفر نحصل على افضل سعة خطية *(Optimum linear capacitance)*

$$C_{op} = \frac{\frac{1}{\omega}\sum_{1}^{n} n\, V_n\, I_n \sin \Phi_n}{\sum_{1}^{n} n^2\, V_n^{\,2} + \sum^{m} m^2\, V_m^{\,2}}$$

وتعرف القدرة غير الفعالة *(reactive power)* من المعادلة

$$Q = \sum_{1}^{n} V_n\, I_n \sin \Phi_n$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sum_{1}^{n} \frac{1}{n} \int_{0}^{T} V_n\, di_n$$

والخلاصة ان معامل القدرة هو النسبة بين القدرة الفعالة *(active power)* الى القدرة الظاهرية *(apparent power)* ، ويختلف عن معامل قدرة زاوية الازاحة عند وجود تشوه بالموجات (العامل μ) ، ويتغير معامل القدرة الحقيقى ، اى فى وجود توافقيات او تشوه الموجة ، من صفر الى الواحد الصحيح معتمداً على طبيعة الاحمال .

ثانياً : تأثير التوافقيات على نظم الاتصالات

ترجع الاضطرابات الحادثة من تأثير توافقيات نظام القدرة على نظم الاتصالات المجاورة الى قربها من أووجودها فى وسط كهربى ناتج من :

١ - التأثير الكهرومغناطيسى ، كما فى شكل (١١-٣) .

٢ - التأثير الكهروستاتيكى ، كما فى شكل (١٢-٣)

ويلاحظ فى الشكلين وقوع خط الاتصالات فى المجالين

تصنف نظم الاتصالات الى

- دوائر التليفونات *(Telephone circuit)*
- دوائر التلغراف *(Telegraph circuit)*

– دوائر الاشارات *(Signal circuit)*

ويكون تردد المركبات الاساسية للتيارات المارة بدوائر التلغراف والاشارات اقل من ٣٠٠ هرتز ، وعلى ذلك فانها تتأثر فقط بالتردد الاساسى وتردد التوافقيات الاقل من ٣٠٠ هرتز ، بينما يقع تردد التيارات بدوائر التليفونات فى حدود ١٠٠ هرتز – ٤ ك. هرتز (وهى حدود الترددات السمعية *audio range*) وتكون دوائر التليفونات هى الاكثر حساسية وتأثراً بالتوافقيات .

فى شكل (١٣–٣) تم تمثيل موصل للاتصالات *(Communication conductor)* موازياً وقريباً من موصل قدرة حاملاً للتيار (خط هوائى *overhead line*) ويعتمد على الجهد الحادث فى دوائر الاتصالات ، نتيجة المجال الكهرومغناطيسى لموصل القدرة على قيمة تيار موصل القدرة والتردد وطول الجزء من الدوائر المتوازية والمحاثة التبادلية ، ويوضح شكل (١٤–٣) المسار الكامل لمرور التيار فى موصل القدرة وانتقالها الى دائرة الاتصالات متمثلة فى خط تليفون مثلاً

ويفرض ان : L : طول الجزء المتوازى من الدائرتين .

M : المحاثة التبادلية *(mutual inductance)* لوحدة الطول

فان الجهد الحادث نتيجة تيار التوافقية n يكون

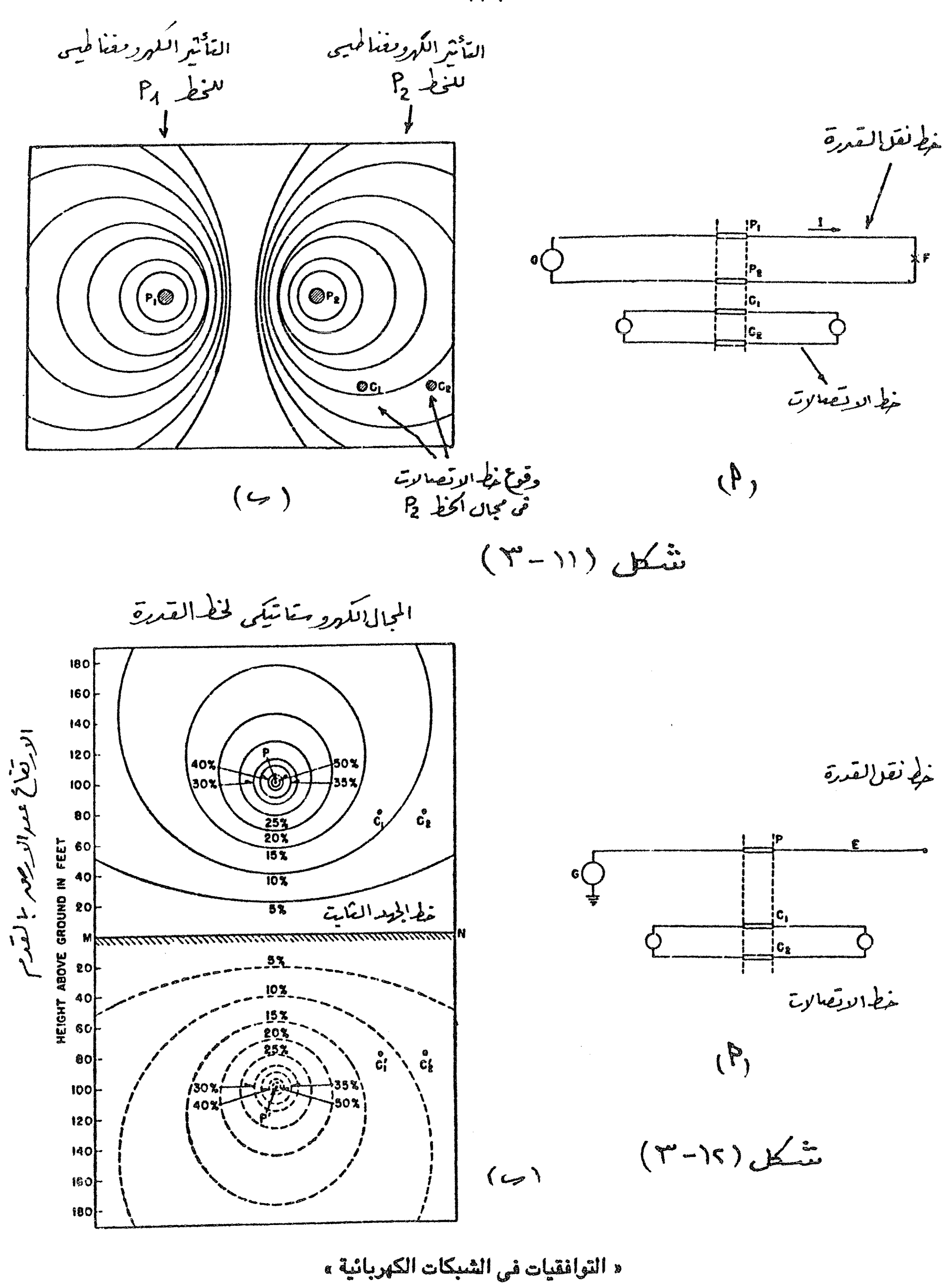
$$E'_n = -j.n.\omega.M.L.I_n$$

وبفرض ان معاوقة الجانبين للجزء المتوازى بين موصل الاتصالات والارض هما Z_A , Z_B فان التيار المار فى هذا الجزء هو

$$I_m = \frac{E'_n}{Z_A + Z_B}$$

ويكون هذا التيار مساوياً للصفر اذا كانت اى من المقاومتين Z_B و Z_A مفصولة ويمكن تمثيل الجهد الحادث فى دوائر الاتصالات نتيجة المجال الكهرومغناطيسى بمصدر جهد E'_n موصلاً على التوالى مع الموصل كما فى شكلى (١٣–٣) ، (١٤–٣) .

ولحساب قيمة المعاوقة التبادلية بين خط الاتصالات وخط القدرة الكهربائية تستخدم المعادلة التالية والتى تعرف بمعادلة كارسون *(Carson's Equation)*



شكل (١١-٣)

شكل (١٢-٣)

$$Z_m = \frac{j\,\omega\,\mu_0}{2\pi}\left\{ln\,\frac{d'_{12}}{d_{12}} - 2j\int\left[\sqrt{(u^2+j)} - u\right]e^{-u\,\alpha\,(h_1+h_2)}\cos(u\,\alpha\,x)\,du\right\}$$

ويوضح شكل (١٥-٣) المسافات المستخدمة

حيث x : المسافة الافقية بين خطى القدرة والاتصالات

h_1 : ارتفاع خط القدرة عن الارض

h_2 : ارتفاع خط الاتصالات من الارض

d_{12} : المسافة بين خطى القدرة والاتصالات وتساوى

$$d_{12} = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + x^2}$$

d'_{12} : المسافة بين خط الاتصالات وصورة لخط القدرة وتساوى

$$d'_{12} = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + x^2}$$

μ_0 : سماحية المسافة الحرة (permeability of free space)

δ : عمق السطح المنتظم من الارض ذات المقاومية ρ (resistivity)

ρ : مقاومية تربة الارض بوحدات (اوم - متر)

$$\alpha = \sqrt{2}/\delta \qquad , \qquad \delta = \sqrt{(2\rho/\mu_0\,\omega)}$$

وبذلك يمكن كتابة معادلة الجهد الحادث نتيجة تيار التوافقية كالآتى

$$E'_n = Z_m I_n$$

وفى حالة ماذا كان خطى القدرة والاتصالات تحت الارض فان اشارتى h_1 , h_2 تصبحان سالبتان .

ونتيجة لقرب خط الاتصالات من موصل القدرة المحاط بمجال كهربى (electric field) فان شحنة كهربائية تحدث بخط الاتصالات ، وتختلف قيمة الشحنة تبعاً لقيمة

جهد خط القدرة وتعتمد على القيم السعوية بين الخطين وبين اى منهما والارض ، كما فى شكل (١٦-٣) . والذى يمثل فيه ايضاً مصدر التوافقيات E_n الحادثة من المجال الكهربى وتاثيرها على خط الاتصالات من خلال المكثف C_{12} .

وبفرض ان قيم المعاوقتين Z_A , Z_B مالانهاية فان الجهد الحادث يساوى

$$E''_n = \frac{E_n C_{12}}{C_{12} + C_2}$$

واذا كانت اى من المعاوقتين Z_A او Z_B مساوية للصفر ، او حدثت دائرة قصر *(Short - circuit)* على دائرة الاتصالات ، فان تيار دائرة القصر المار يكون

$$I''_n = \omega . C_{12} . E_n$$

اما اذا حدثت دائرة القصر عند الجانبين فان التيار المار فى كل دائرة قصر يساوى $0.5\, I''_n$

وعلى العموم يعرف تأثير كل من المجال المغناطيسي والكهربى على دائرة الاتصالات بانه جهود طولية *Longitudinal voltages* تبعاً للترددات المختلفة ، وحيث ان اسلاك دوائر الاتصالات تكون غير متماثلة فى بعدها بالنسبة لخط القدرة فتكون الجهود الطولية الحادثة اكبر قليلاً على سلك الاتصالات الاقرب لخط القدرة من جهود الاسلاك الاخرى . ونتيجة الاختلاف فى الجهود الطولية تحدث جهود معترضة *(Transverse voltages)* والتى تكون صغيرة بالنسبة لقيمة الجهود الطولية .

وحيث ان دائرة التليفون تتكون ببساطة من زوجين من الاسلاك الملتوية *(Twisted pair of wires)* متصلين مع جهاز التليفون ، كما فى شكل (١٧-٣) فانه يمكن تمثيل الجهود الحادثة E'_n , E''_n على التوالى والتوازى لكل سلك . كذلك يوضح الشكل الجهد المعترض الحادث بين السلكين وخاصة فى اسلاك التليفونات الهوائية ، بينما فى اسلاك التليفونات الارضية فان الجهود الطولية تكون متساوية وهناك سماحية بحدود معينة لعدم الاتزان فى الخطوط التليفونية (اى عدم تساوى معاوقة السلكين وكذلك عدم تساوى السعوية والتسرب الارضى) تختلف فى الخطوط الهوائية عنها فى الخطوط الارضية ويعرف اتزان دائرة التليفون بالنسبة للارض من العلاقة

$$20 \log_{10} \frac{Longitudinal\ voltage}{Transverse\ voltage}$$

وتكون حدود هذه القيمة من ٤٥ - ٥٠ ديسبل

عادة تكون كابلات التليفونات محاطة بغلاف خارجي (*sheath*) واذا كان هذا الغلاف مؤرضاً ولو عند نقطة واحدة على الاقل ، فانها لاتتأثر بالجهود الناتجة من المجال الكهروستاتيكى . بينما يسبب المجال الكهرومغناطيسى مرور تيار فى الغلاف والذى يحجب عن الموصل داخله اى يحمى موصل التليفون من المجال الكهرومغناطيسى وتزيد هذه الحماية كلما زاد التردد ، فمثلاً كابل تليفون له غلاف من الرصاص ، والمقطع المستعرض (*cross - section*) يساوى ٢٠٠ مللمتر ، ولايحتوى على درع (*armour*) فان نسبة الجهد الحادث (*induced voltage*) تقل تبعاً لزيادة التردد كما فى الجدول رقم (١-٣)

جدول رقم (١-٣)

التردد (هرتز)	٥٠	٢٥٠	٥٥٠	٨٥٠	١١٥٠	١٤٥٠	١٧٥٠	٢٠٥٠
الجهد الحادث ٪	٨٥	٣٠	١٤,٣	٩,٣	٦,٩	٥,٥	٤,٥	٣,٩

بينما يمثل الجهد الحادث ١٠٠ ٪ بالجهد الحادث فى سلك مفتوح مفرد (*Single open - wire*) .

اما اذا كان الكابل يحتوى على درع (*armoured cable*) فان قيم الجهد الحادث ٪ تقل بدرجة كبيرة جداً .

ومن الاهمية معرفة كمية الشوشوة (*noise*) الحادثة من التوافقيات والتى تعتمد فى المقام الاول على التردد المستجاب فى دوائر الاتصالات . وتكون خطوط التليفونات هى الاكثر حساسية لهذه التأثيرات . وتحدد الاستجابة الترددية (*Frequency response*) لمستقبلات التليفونات (*Telephone receiver*) من ٢٠٠ هرتز الى ٣٥٠٠ هرتز ، بينما يكون التردد المستجاب لاذن الانسان من ١٥ هرتز الى ١٥ ك. هرتز . وتتغير الاستجابة

مع التردد ويؤخذ التردد ٨٠٠ هرتز كمرجع لمعدات التليفونات (احياناً يؤخذ ١٠٠٠ هرتز) بينما للتيار والجهود (المؤثرة والمتأثرة) والتى تعمل عند ترددات اخرى فانها تحول الى تردد المرجع ٨٠٠ هرتز باستخدام عامل الوزن (*weighting factor*) ويوضح شكل (١٨-٣) العلاقة بين عامل الوزن A_n ودرجات التوافقيات ويسمى المجموع الكلى بجهود التوافقيات المحولة بجهد الاضطراب المكافئ (*Equivalent disturbing voltage*) ، واذا عبرنا عنه كنسبة من جهد الخط فيعرف بعامل توافقية التليفون (*Telephone harmonic factor*) ويعطى من العلاقة

$$V_{800}\,\% = \frac{\sqrt{\sum A_n^2 \cdot V_n^2}}{V} \times 100$$

او باستخدام قيم التيارات كالآتى

$$I_{800}\,\% = \frac{\sqrt{\sum A_n^2 \cdot I_n^2}}{I} \times 100$$

ويكون معيار الاضطرابات هو النسبة بين قيمة الاشارة الصوتية الى جهد الشوشرة الحادث (*Signal / noise ratio*) .

وللتبسيط يقترح الاسترشاد بالقيم القياسية الآتية

- يكون مستوى الشوشرة الكلى للوزن (وهو جذر متوسط المربعات لجميع الجهود الحادثة منسوبة الى ٨٠٠ هرتز) يساوى ٢ مللى ڤولت للكابلات .
- يكون مستوى الشوشرة الكلى للوزن يساوى ٥ مللى فولت للخطوط الهوائية .
- تكون قيمة $V_{800}\,\%$ (محسوبة من المعادلة السابقة) من ١ - ٢ ٪ عند اى موضع على الشبكة وعلى ذلك تصبح قيمة معامل الوزن $\frac{A_n f}{800}$ بدلاً من A_n وفى هــذه الحالــة يعــرف $V_{800}\,\%$ بانه عامل تداخل التليفون (*Telephone interference factor*) .

وفيما يلى مثالاً عملياً للمسافة بين خطوط التليفونات وخطوط القوى الكهربائية فى شبكة روسيا التى تعتمد على جهد الشبكة :

- مسافة ٣٠ م لخطوط النقل جهد ٣٥ ، ١١٠ ك .ف
- مسافة ٥٠ م لخطوط النقل جهد ٢٢٠ ك .ف

- مسافة ٦٠ م لخطوط النقل جهد ٤٠٠ ك .ف

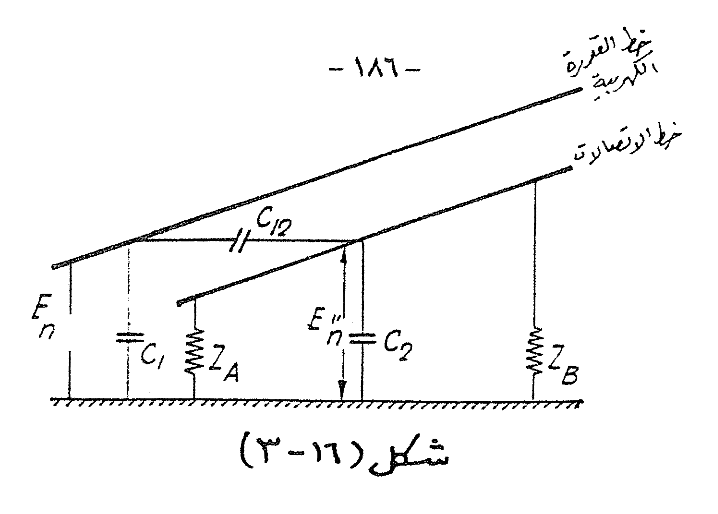
فى هذه الحالة تهمل الاضطرابات الناتجة من المجال الكهربى ويؤخذ فى الاعتبار الاضطرابات الناتجة من المجال الكهرومغناطيسى .

وفى حالة ماذا كانت المسافة اكبر من ٢٠٠ م فان التأثير الوحيد على خطوط التليفونات يكون نتيجة التتابعية الصفرية *(Zero - sequence current)* المار بمسار التعادل والارضى والحادث من عدم اتزان الشبكة .

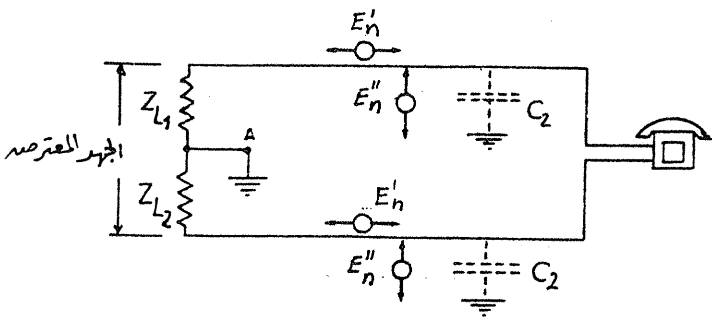
شكل (١٣-٣)

شكل (١٤-٣)

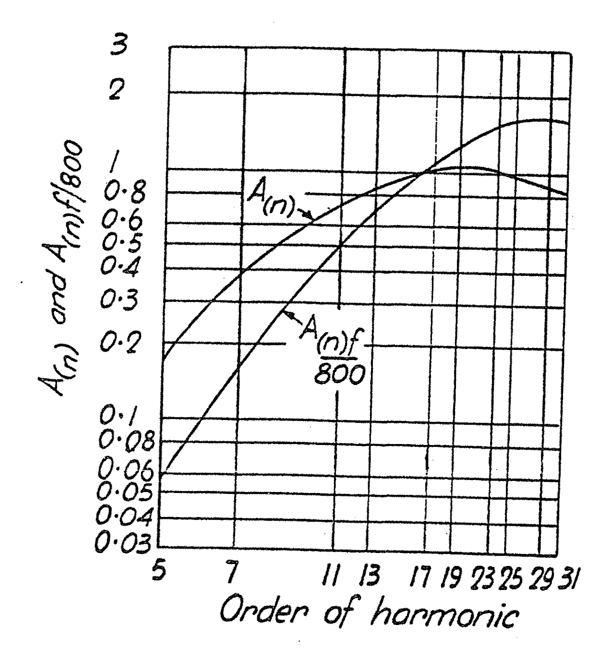
شكل (١٥-٣)



شكل (١٦-٣)



شكل (١٧-٣)



شكل (١٨-٣)

الباب الرابع

البيانات الاساسية للشبكة الكهربائية

عند القيام بعمل دراسة للتوافقيات لشبكة كهربائية يلزم معرفة الآتى :

- رسم خطى للشبكة *Single line diagram* .

- البيانات المكونة لهذه الشبكة والممثلة فى معاوقة كل جزء من مكونات هذه الشبكة وعموماً تتكون اى شبكة كهربائية من : كابلات - محولات - ممانعات - مكثفات ....

وتستخدم هذه البيانات لحساب المعاوقة الكلية للمدخل والتى تساوى محصلة المعاوقات (توالى /توازى) على القضبان التى تحتوى على مصدر للتوافقيات ، ويتم تمثيل مصدر التوافقيات بمصدر تيار . ويوضح شكل (١-٤) أ رسم خطى لشبكة تحتوى على موحدات كمصدر تيار توافقيات ومحول ومحرك ومكثف ، ونحتاج لحساب جهد التوافقيات ان نحسب معاوقة المدخل ، باستخدام طريقة تمثيل المعاوقات كما فى شكل (١-٤) ب ، وهى محصلة معاوقات المحول والمحرك والمكثف .

وفيما يلى توضيح البيانات اللازمة لكل مكون حتى يمكن حساب المعاوقة المكافئة للشبكة (Z) .

١ - الكابلات *(Cables)*

لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للكابل يلزم معرفة الآتى :

- طول الكابل *(length)* .
- مقطع الكابل $(size : MCM \ or \ mm^2)$
- مادة الموصل (الومنيوم او نحاس)
- الموصلات (أحادية أو ثلاثية)
- عدد الموصلات / وجه
- شكل التسليح *(shield information)*

ولحساب المعاوقة (Z) للكابل عند تردد التوافقيات ، فيجب اتباع الآتى:

١ - نحسب مقاومة الكابل $(R_{d.c})$ بوحدات ohm / km عند درجة حرارة $20\ ^oc$

أ - طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية . I.S; 1753 - 1961
& I.S : 434 - 1964

- للكابلات الالومنيوم ذات الموصلات المصمته *(solid)* والموصلات الدائرية المجدولة *(stranded circular)* ، يستخدم جدول (١-٤) .

- للكابلات النحاس ذات الموصلات المصمته *(solid)* والموصلات الدائرية المجدولة *(stranded circular)* ، يستخدم جدول (٢-٤) .

وعندما تتغير درجة الحرارة عن $20^o c$ تضرب المقاومة فى عامل تصحيح تبعاً لدرجة الحرارة الجديدة ويستخدم لذلك الجدول رقم (٣-٤) .

او يمكن استخدام المعادلات الآتية للحصول على المقاومة الجديدة عندما تتغير درجة الحرارة :

فى حالة موصلات من النحاس

$$R_\delta = R_{20} \left(\frac{234.5 + \delta}{254.5} \right)$$

فى حالة موصلات من الالومـنيوم

$$R_\delta = R_{20} \left(\frac{228 + \delta}{248} \right)$$

حيث :

δ = درجة الحرارة الجديدة

R_{20} = المقاومة عند درجة الحرارة $20^o c$ بوحدات Ω/km

R_δ = المقاومة عند درجة الحرارة δ

ب - طبقاً للمواصفات الالمانية DIN

يوضح جدول (٤-٤) قيمة $R_{d.c}$ للكابلات الالومنيوم والنحاس عند درجة حرارة $20^o c$

وعندما تتغير درجة الحرارة من $20^o c$ الى $\theta^o c$ تصبح معادلة المقاومة

$$R_\theta = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

حيث :

R_θ = مقاومة الكابل عند $\theta^o c$ بوحدات Ω/km

جدول(١-٤)

مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^o c$	مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^o c$
1.5	18.48	95	0.31
2.5	11.18	120	0.235
4	7.219	150	0.198
6	4.620	185	0.159
10	2.874	240	0.11
16	1.821	360	0.096
25	1.049	400	0.067
35	0.842	500	0.057
50	0.584	625	0.045
70	0.387		

I.S : 1753 - 1961

جدول(٢-٤)

مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^o c$	مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^o c$
1	17.5	50	0.363
1.5	11.2	70	0.234
2.5	6.775	95	0.188
4.0	4.375	120	0.142
6.0	2.8	150	0.12
10	1.627	185	0.096
16	1.104	240	0.073
25	0.635	300	0.058
35	0.510	400	0.040

I.S : 1753 - 1961

جدول(٣-٤)

درجة الحرارة C^o	النحاس	الالومنيوم
10	0.9607	0.960
15	0.9804	0.980
20	1.000	1.000
25	1.0197	1.020
30	1.0393	1.040
35	1.0590	1.060
40	1.0786	1.080
50	1.1179	1.120
60	1.1572	1.160
70	1.1965	1.200
80	1.2358	1.240

جدول(٤-٤)

مساحة المقطع mm^2	R_{dc} at $20\,^oc$ Ω / km	
	النحاس	الالومنيوم
1.5	11.9	
2.5	7.14	12.1
4	4.46	7.58
6	2.98	5.05
10	1.79	3.03
16	1.12	1.89
25	0.714	1.21
35	0.510	0.866
50	0.357	0.606
70	0.255	0.433
95	0.188	0.319
120	0.149	0.253
150	0.119	0.202
185	0.097	0.164
240	0.074	0.126
300	0.0595	0.101
400	0.0446	0.0758
500	0.0357	0.0606

α_{20} = معامل الحرارة (Temperature coefficient) للمقاومة الكهربية

= $0.00393\ deg^{-1}$ للنحاس

= $0.00403\ deg^{-1}$ للالومنيوم

وتكون المقاومة الفعالة (effective resistance) للتردد 50 Hz عند درجة حرارة التشغيل θ [وتعرف ايضاً بمقاومة التردد المتغير a.c resistance] هى

$$R_{\omega\theta} = R_{\theta} + \Delta R$$

حيث ΔR هى مقاومة اضافية بوحدات Ω/km لتحويل مقاومة d.c لمقاومة a.c وهى راجعة الى الظاهرة السطحية (skin effect) بالاضافة الى الظاهرة التجاورية (proximity effect) . ويوضح شكل (٢-٤) العلاقة بين ΔR ومساحة مقطع الكابل .

عموماً عند تغيير التردد الاساسى فيجب ايجاد R_{ac} عند التردد الجديد كالآتى من المنحنى الموضح بشكل (٢-٤) وبعد حساب $\sqrt{\frac{f}{R_{d.c}}}$ نحصل على النسبة $\frac{R_{a.c}}{R_{d.c}}$ فمثلاً عند تردد التوافقية السادسة ، اى $f = 300\ Hz$ ، ولقيمة $R_{d.c} = 0.0595\ \Omega/km$ لكابل نحاس $300\ mm^2$ فان

$$\sqrt{\frac{f}{R_{d.c}}} = 71 \qquad \& \qquad \frac{R_{d.c}}{R_{a.c}} \simeq 1.4$$

$$R_{a.c} = 1.4 \times 0.0595 = 0.0833\ \Omega / km$$

٢ - نحسب ممانعة (reactance) الكابل عند تردد التوافقية n .

حيث :

$$X_n = n\, X$$

X_n ممانعة الكابل عند تردد التوافقية n .

X ممانعة الكابل عند التردد الاساسى 50 Hz تبعاً لجداول الشركة الصانعة او المواصفات القياسية .

أ - طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية I.S : 694 - 1946, I.S :1554-1964 يستخدم جدول (٥-٤) لقيم الممانعة X للكابلات الالومنيوم المعزولة بمادة P.V.C للجهود المنخفضة .

ب - طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية

I.S : 434 - 1955 , I.S : 694 - 1960

يستخدم جدول (٦-٤) لقيم الممانعة X لكابلات نحاس معزولة بمادة PVC للجهود المنخفضة (وحدات المساحة بهذا الجدول هى البوصـــة المربعة (in^2) ووحــدات الممانعــة Ω / 1000 yards ولتحويل 1000 yard إلى km نضرب فى 1.0936) .

جدول(٥-٤)

مساحة المقطع mm^2	250 / 440 V X Ω / km	650 / 1100 V X Ω / km
1.5	0.09997	0.1091
2.5	0.09716	0.1047
4.0	0.09483	0.1012
6.0	0.08927	0.09485
10	0.08418	0.08895
16	0.08221	0.08589
25	0.08142	0.08429
35	0.07986	0.08251
50	0.07986	0.08207
70	0.07726	0.07640
95	-	0.07674
120	-	0.07356
150	-	0.07367
185	-	0.07359
240	-	0.07260

جدول(٦-٤)

مساحة المقطع in^2	250 v — X Ω / 1000 yard	660 v — X Ω / 1000 yard
0.0015	0.1121	0.1330
0.002	0.1064	0.1262
0.003	0.1008	0.1177
0.0045	0.09454	0.1106
0.007	0.09230	0.1060
0.01	0.08769	0.09985
0.0145	0.08636	0.09516
0.0225	0.08213	0.09103
0.03	0.07917	0.08434
0.04	0.07782	0.08241
0.06	0.07575	0.07840
0.1	-	0.07512
0.15	-	0.07245
0.2	-	0.07201
0.3	-	0.07038
0.4	-	0.07026
0.5	-	0.06998
0.75	-	0.06837
1.0	-	0.06724

جـ - طبقاً للمواصفات القياسية الالمانية VDE

يستخدم جدول (٧-٤) الممانعة X لكابلات ثلاثية الاوجه للجهد المنخفض والمتوسط .

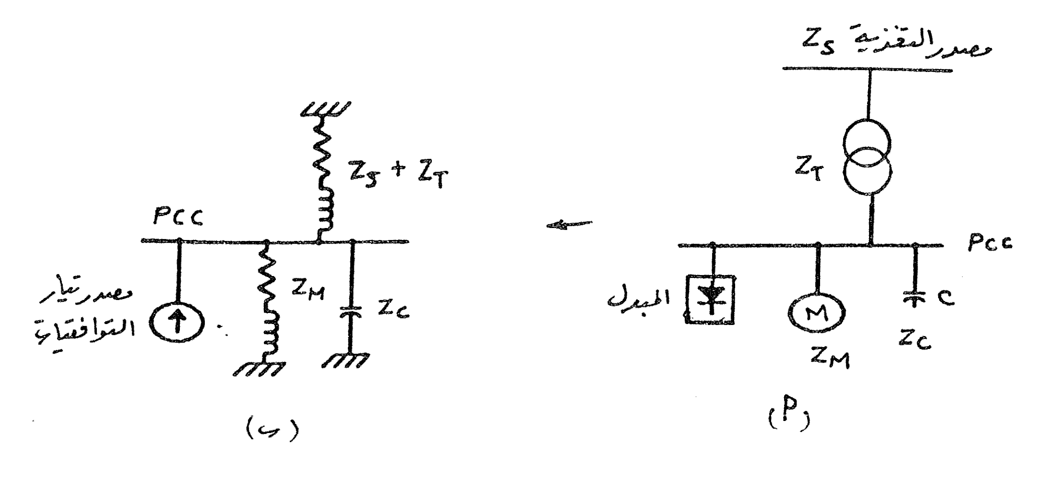
ملحوظة :

يمكن اهمال معاوقة الكابلات جهد ١١ ك . ف بالنسبة لمعاوقة المحولات .

٢ - الخطوط الهوائية (Aerial lines)

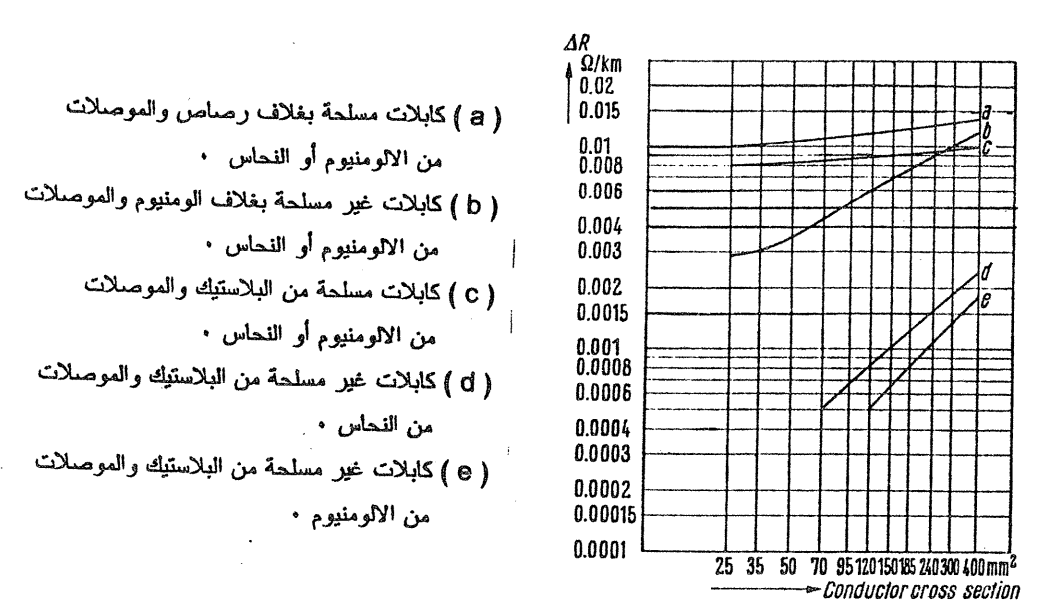
لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للخطوط الهوائية يلزم معرفة الآتى :

- طول الخط
- مقطع الكابل $(size : mm^2)$



مصدر التغذية Z_S
Z_T
Pcc
C
Z_C
المبدل
M
Z_M
(أ)
$Z_S + Z_T$
PCC
مصدر تيار التوافقيات
Z_M
Z_C
(ب)

شكل (٤-١)



(a) كابلات مسلحة بغلاف رصاص والموصلات من الالومنيوم أو النحاس ٠
(b) كابلات غير مسلحة بغلاف الومنيوم والموصلات من الالومنيوم أو النحاس ٠
(c) كابلات مسلحة من البلاستيك والموصلات من الالومنيوم أو النحاس ٠
(d) كابلات غير مسلحة من البلاستيك والموصلات من النحاس ٠
(e) كابلات غير مسلحة من البلاستيك والموصلات من الالومنيوم ٠
ΔR
Ω/km
0.02
0.015
0.01
0.008
0.006
0.004
0.003
0.002
0.0015
0.001
0.0008
0.0006
0.0004
0.0003
0.0002
0.00015
0.0001
a
b
c
d
e
25 35 50 70 95 120 150 185 240 300 400 mm²
Conductor cross section

شكل (٤-٢)

- مادة الموصل (الومنيوم او نحاس)
- عدد الموصلات / وجه
- الموصلات (احادية او ثلاثية)

٣ - المحولات *(Transformers)*

لحساب المقاومة *(R)* والممانعة *(X)* للمحولات يلزم معرفة البيانات الآتية للمحول:

- قدرة المحول *(KVA or MVA)*
- النسبة المئوية لمعاوقة (% *impedance*) المحول
- نسبة تحويل الجهد
- النسبة *X/R* للمحول (ان امكن)
- المجموعة الاتجاهية للمحول
- نظام تأريض نقطة التعادل (مؤرضة مباشرة مع الارض او من خلال معاوقة)
- نوع المحول (جاف او مملوء بالزيت)

ويوضح كلا الجدولين (٤-٧) ، (٤-٨) قيم المعاوقة X (عند التردد *50 Hz*) تبعاً لقدرة المحول.وتكون معاوقة المحول عند تردد التوافقية n

$$X_n = n\,X$$

ويفضل تحويل قيم $Z\%$ للمحولات تحت الدراسة الى وحدات $p.u$ باستخدام العلاقة

$$Z_{p.u} = \frac{(Z\%)\,(KVA_b)}{(KVA_T)}$$

حيث :

KVA_b قيمة تختار كمرجع او اساس *(base)*

KVA_T قدرة المحول .

جدول(٧-٤)

مساحة المقطع mm^2	0.6 / 1 k.v $x \ \Omega / Km$	5.8 / 10 k.v $x \ \Omega / Km$
3 x 6	0.102	-
3 x 10	0.095	0.142
3 X 16	0.090	0.132
3 X 25	0.086	0.122
3 X 35	0.083	0.112
3 X 50	0.081	0.106
3 X 70	0.079	0.101
3 X 95	0.077	0.098
3 X 120	0.077	0.095
3 X 150	0.077	0.092
3 X 185	0.076	0.090
3 X 240	0.076	0.088
3 X 300	0.075	0.086
3 X 400	0.075	-

جدول(٨-٤)

قدرة المحول KVA	$V \leq 36$ kv X %	$V > 36$ kv X %
up to 630	4	-
630 - 3150	6	-
3150 - 10000	8	10
10000 - 40000	10	11
40000 - 20000	-	12.5

جدول(٩-٤)

قيمة المعاوقة $Z\%$ لمحولات ذات ملفين عند تردد 50 Hz

قدرة المحول MVA	قيمة جهد ملفات الجهد العالى				
	للجهود حتى 11 kv	22 kV	33 kV	66 kV	132 k
0.10	4.75	5.00	5.00	-	-
0.25	4.75	5.00	5.00	-	-
0.50	4.75	5.00	5.00	-	-
0.75	4.75	5.00	5.00	-	-
1.00	4.75	5.00	5.00	6.00	-
1.50	5.50	6.00	6.00	7.00	-
2.00	6.00	6.00	6.00	7.00	-
2.50	6.00	6.00	6.00	7.00	-
3.00	6.00	7.00	7.00	7.50	-
4.00	6.00	7.00	7.00	7.50	-
5.00	6.00	7.00	7.00	7.50	-
7.50	7.00	8.00	8.00	8.50	9.00
10.00	9.00	9.00	9.00	9.00	10.00
15.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
20.00	-	10.00	10.00	10.00	10.00
30.00	-	-	10.00	10.00	10.00
45.00	-	-	-	10.00	12.50
60.00	-	-	-	10.00	12.50
75.00	-	-	-	-	12.50

للمحولات 150 kv تؤخذ $Z\% = 12\% - 15\%$

للمحولات 275 kv تؤخذ $Z\% = 15\% - 20\%$

اذا كانت (X/R) للمحول معلومة عند التردد $50\ Hz$ أو بالحصول على هذه النسبة من شكل (٤-٤)،فانه باستخدام الجدول رقم (١٠-٤) يمكن ايجاد قيم R_n , X_n باستخدام عاملى الضرب للمانعة والمقاومة اى ان :

$$R_n = K\,R$$

$$X_n = n\,X$$

كما يمكن الحصول على قيمة عامل الضرب (k) للمقاومة بدلالة n من المنحنى الموضح بشكل(٥-٤) .

٤ - بيانات المصدر أو المنفعة (Utility Data)

يجب حساب قدرة النظام KVA_{syst} وذلك لحساب درجة التوافقية n التى يحدث عندها حالة الرنين فى حالة وجود مكثفات قدرتها $KVAr$ بالشبكة حيث :

$$n = \sqrt{\frac{KVA_{syst}}{KVAr}}$$

ولحساب KVA_{syst} يلزم معرفة :

$KVA_{sc}\ of\ utility$: قدرة دائرة القصر للمصدر .

$KVA_{s.c(T)}$: قدرة دائرة القصر للمحول وتساوى $\frac{KVA_t}{Z\ \%}\ X\ 100$.

وتكون معادلة KVA_{syst} كالآتى :

$$KVA_{syst} = \frac{KVA_{sc}\ of\ utility \times KVA_{s.c(T)}}{KVA_{sc}\ of\ utility + KVA_{s.c(T)}}$$

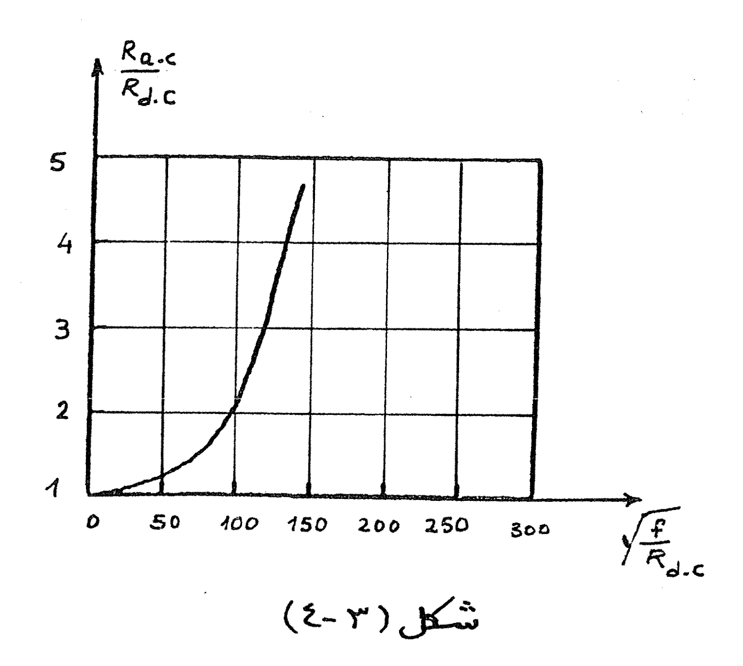
٥ - المكثفات (Capacitors)

نحتاج الى معرفة قدرة المكثف $KVAr$ أو $MVAr$ والجهد المقنن KV_{LL} ونحسب ممانعة المكثف X_c من المعادلة

$$X_c = -\ \frac{(KV_{LL})^2}{MVAr}\ \Omega$$

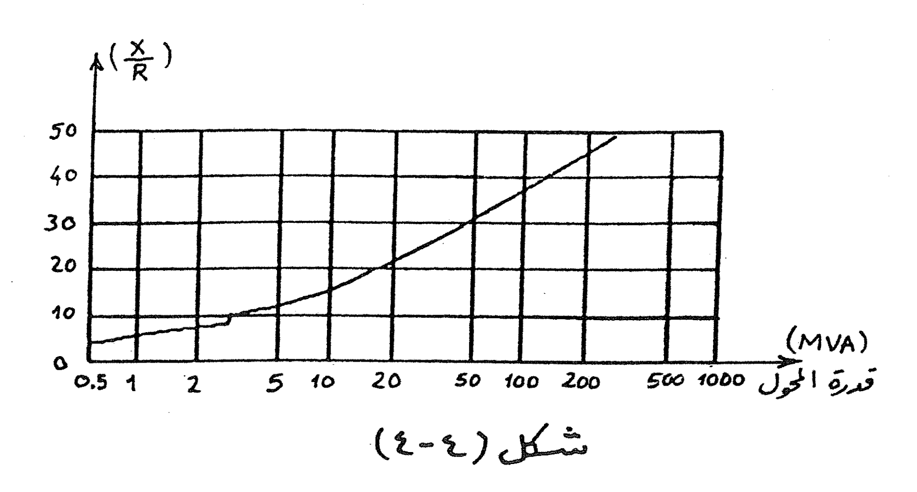
جدول(١٠-٤)

عامل الضرب للممانعة (n)	عامل الضرب للمقاومة (K)	درجة التوافقية n
1	1	1
2	1.5	2
3	2	3
4	3	4
5	4	5
6	5	6
7	6	7
8	8	8
9	10	9
10	11	10
11	12	11
12	16	12
13	17	13
14	21	14
15	23	15
16	27	16
17	29	17
18	33	18
19	37	19
20	40	20
21	43	21
22	47	22
23	53	23
24	56	24
25	61	25



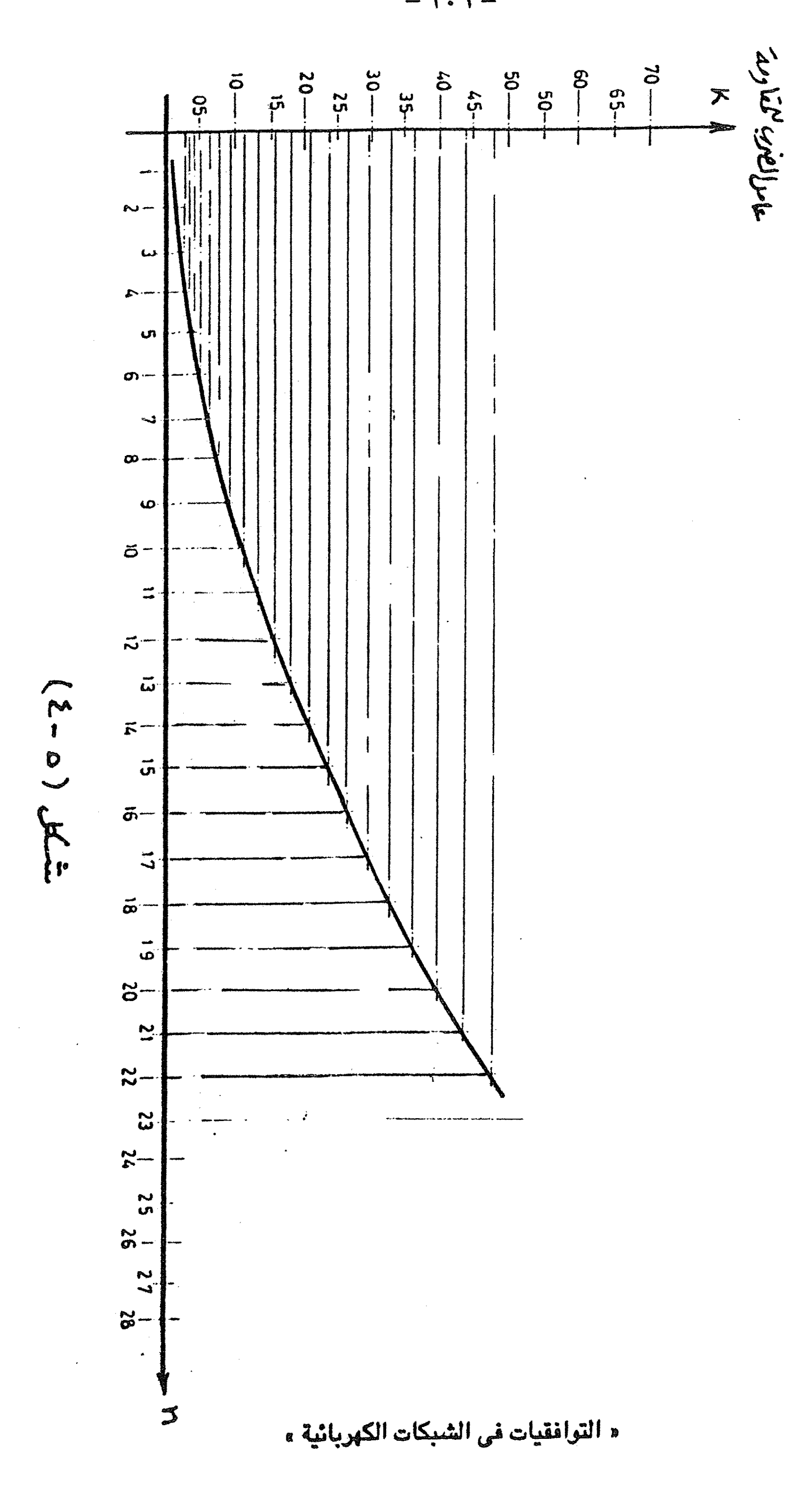
$\frac{R_{a.c}}{R_{d.c}}$
5
4
3
2
1
0
50
100
150
200
250
300
$\sqrt{\frac{f}{R_{d.c}}}$

شكل (٣-٤)



(X/R)
50
40
30
20
10
0
0.5
1
2
5
10
20
50
100
200
500
1000
(MVA)
قدرة المحول

شكل (٤-٤)



شكل (٥-٤)

وتتغير ممانعة المكثف X_c مع تردد التوافقية n كالآتى :

$$X_{cn} = \frac{1}{n} X_c \quad \Omega$$

ثم تحول الى وحدات $p.u$ من المعادلة

$$X_{cn} = \left(\frac{1}{n} X_c\right)\left(\frac{MVA_b}{KV_{LL}^2}\right)$$

٦ - المفاعلات *(Reactors)*

نحتاج للبيانات الآتية لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للمفاعل :

- قيمة الممانعة X بالاوم
- العامل Q والذى يساوي $\frac{\omega L}{R}$

لحساب X , R عند تردد التوافقية n نتبع الآتى

فى حالة مفاعل من الالومنيوم تستخدم المعادلة التالية

$$R_n = \left(\frac{0.115\, n^2 + 1}{1.115}\right) R = K_1 R$$

اما فى حالة مفاعل من النحاس فنستخدم المعادلة التالية

$$R_n = \left(\frac{0.055\, n^2 + 1}{1.055}\right) R = K_2 R$$

ويمكن الحصول من جدول رقم (١١-٤) على قيمتى K_1 , K_2

وتكون ممانعة المفاعل عند التردد n تساوى

$$X_n = n X$$

٧ - المحركات *(Motors)*

تعتبر المحركات كأحمال ، ونحتاج للبيانات التالية

- قدرة المحرك بالحصان
- الممانعة دون العابرة *(Subtransient reactance)* للمحرك والتى يرمز لها X''_d .
- معامل القدرة (فى حالة المحركات المتزامنة)

وتكون مقاومة المحرك عند تردد التوافقية n تساوى

$$R_n = nR$$

وممانعة المحرك عند تردد التوافقية n تساوى

$$X_n = n X$$

كما يجب تحويل قدرة المحرك من الحصان الى KVA حيث $(1\ HP = 1\ KVA)$

ونحول قيم الممانعة الى وحدات $p.u$ كالآتى :

$$X = X''_d \left(\frac{KVA_b}{KAV_{motor}} \right) \qquad p.u$$

ويوضح شكل (٦-٤) أ العلاقة بين $\frac{X}{R}$ وقدرة المحركات التأثيرية ثلاثية الاوجه كما يوضح شكل (٦-٤) ب العلاقة بين $\frac{X}{R}$ وقدرة المحركات المتزامنة (وللمولدات ذات الاقطاب البارزة) .

٨ - المولدات الموضعية (Local Generators)

تمثل المولدات الموضعية كأحمال على الشبكة الكهربائية . ونحتاج لعدة بيانات عند دراسة التوافقيات مثل :

أ - قدرة المولد KVA

ب - ممانعة المولد (subtransient reactance) والتى يرمز لها X''_d

جـ - معامل القدرة

ولحساب معاوقة المولد عند تردد التوافقيات فان :

$$R_n = n R$$

$$X_n = n X$$

حيث R,X ممانعة ومقاومة المولد عند التردد الاساسى

R_n , X_n ممانعة ومقاومة المولد عند التردد n

ويمكن الحصول على النسبة $\frac{X}{R}$ من الشكل (٦-٤) ب .

جدول(١١-٤)

درجة التوافقية n	عامل الضرب للمقاومة الالومنيوم (K_1)	عامل الضرب للمقاومة النحاس (K_2)
1	1	1
2	1.3094	1.1563
3	1.8251	1.4170
4	2.5471	1.7819
5	3.4753	2.2511
6	4.6098	2.8246
7	5.9506	3.5024
8	7.4977	4.2844
9	9.2511	5.1706
10	11.2107	6.1611
11	13.3766	7.2559
12	15.7488	8.4549
13	18.3273	9.7583
14	21.1121	11.1658
15	24.1031	12.6777

مثال (١-٤)

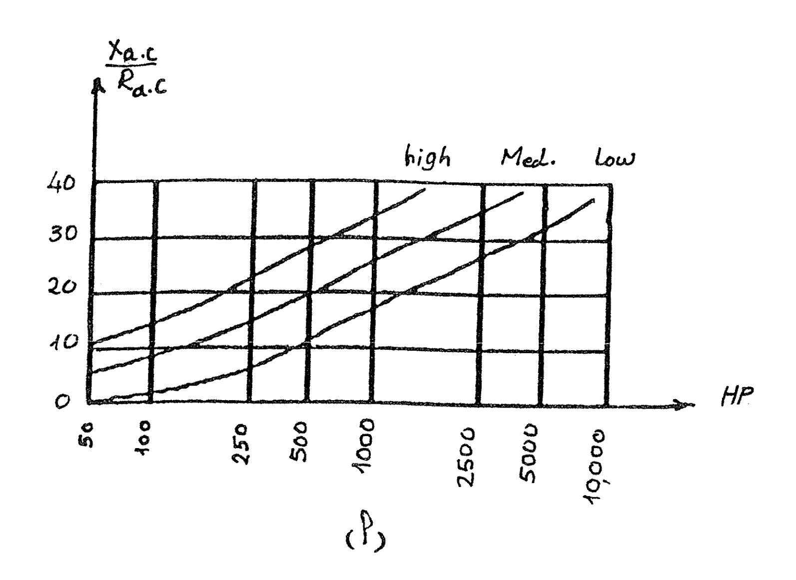
احسب معاوقة المدخل عند نقطة الربط المشتركة *(pcc)* لتردد التوافقيات بالشبكة الموضحة بشكل(٧-٤)أ

الحل :

نبدأ بتمثيل معاوقات الشبكة . كما فى شكل (٧-٤) ب ونختار $MVA_b = 100$

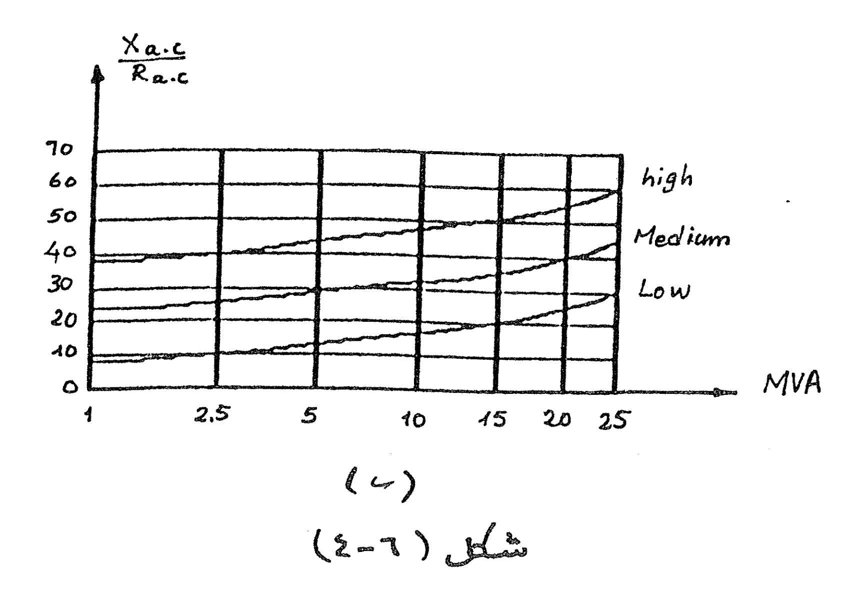
حساب معاوقة المصدر Z_s

$$Z_{p.u} = \frac{MVA_b}{MVA_{s.c}}$$



$X_{a.c}$ / $R_{a.c}$
high
Med.
Low
40
30
20
10
0
HP
50
100
250
500
1000
2500
5000
10,000

(أ)



$X_{a.c}$ / $R_{a.c}$
70
60
50
40
30
20
10
0
high
Medium
Low
MVA
1
2,5
5
10
15
20
25

(ب)

شكل (٦-٤)

$$Z_{p.u} = \frac{100}{1000} = 0.1\ p.u$$

$$R_s = \frac{Z_{p.u}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = \frac{0.1}{\sqrt{(10)^2 + 1}} \simeq 0.01\ p.u$$

$$X_s = R_s\left(\frac{X}{R}\right) = 0.01\ x\ 10 \simeq 0.1\ p.u$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \simeq 0.0999\ p.u$$

ونفترض ان معاوقة المصدر Z_s لاتتغير مع تردد التوافقيات

حساب معاوقة المحول T_1

$$Z_{p.u} = \frac{Z\ \%\ (MVA_b)}{MVA_T}$$

$$= \frac{0.06\ X\ 100}{20} = 0.3$$

من شكل (٤-٤) نحصل على $\frac{X}{R} = 20$ عند $20\ MVA$

$$R_{T1} = \frac{Z_{p.u}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = 0.015\ p.u$$

$$X_{T1} = R_{T1}\left(\frac{X}{R}\right) = 0.3\ p.u$$

ثم نحسب R_{T1} , X_{T1} عند تردد التوافقيات باستخدام جدول (٤-١٠) كالآتى :

عدد التوافقيات n	عامل الضرب للمقاومة k	عامل الضرب للممانعة n	$R_{n(T1)}$	$X_{n(T1)}$
1	1	1	0.015	0.3
2	1.5	2	0.0225	0.6
3	2	3	0.03	0.9
4	3	4	0.045	1.2
5	4	5	0.06	1.5
6	5	6	0.075	1.8
7	6	7	0.09	2.1
8	8	8	0.120	2.4
9	10	9	0.150	2.7
10	11	10	0.165	3.0
11	12	11	0.18	3.3
12	16	12	0.24	3.6
13	17	13	0.255	3.9

حساب معاوقة المحول T_2

$$Zp.u = \frac{Z\%\ (MVA_b)}{MVA_T} = 1.2$$

من شكل (٤ - ٤) نحصل على $\frac{X}{R} = 12$ عند $5\ MVA$

$$R_{T2} = \frac{Zp.u}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = \frac{1.2}{\sqrt{(12)^2 + 1}} = 0.0996\ p.u$$

$$X_{T2} = R_{T2}\ \frac{X}{R} \simeq 1.1952\ p.u$$

ثم نحسب R_{T2} , X_{T2} عند تردد التوافقيات باستخدام جدول (١٠-٤) كالآتى :

عدد التوافقيات n	عامل الضرب للمقاومة k	عامل الضرب للممانعة n	$R_{n(T2)}$	$X_{n(T2)}$
1	1	1	0.0996	1.1952
2	1.5	2	0.1494	2.3904
3	2	3	0.1992	3.5856
4	3	4	0.2988	4.7808
5	4	5	0.3984	5.9760
6	5	6	0.498	7.1712
7	6	7	0.5976	8.3664
8	8	8	0.7968	9.5616
9	10	9	0.9960	10.7568
10	11	10	1.0956	11.9520
11	12	11	1.1952	13.1472
12	16	12	1.5936	14.3424
13	17	13	1.6932	15.5376

حساب معاوقة المكثف C

$$X_c = \frac{-(KV_{LL})^2}{MVAc}$$

$$X_{c\,(p.u)} = \frac{X_c\,(MVA_b)}{(KV_{LL})^2} = -\frac{(MVA_b)}{(MVAc)} = \frac{-100}{0.9} = -111\ p.u$$

وتهمل مقاومة المكثف

ثم نحسب X_c عند تردد التوافقيات من العلاقة $X_{cn} = \dfrac{X_c}{n}$

درجة التوافقية n	X_{cn}
1	-111
2	-55.2
3	-37
4	-27.75
5	-22.2
6	-18.5
7	-15.857
8	-13.875
9	-12.333
10	-11.1
11	-10.1
12	-9.25
13	-8.538

حساب معاوقة المحرك

$$X_{p.u} = \frac{X_d'' \, MVA_b}{MVA_M}$$

$$= \frac{0.17 \times 100}{2} = 8.5\ p.u$$

من شكل (٦-٤) أ نحصل على $\frac{X}{R} = 32$ عند $2000\ HP$

$$R_{p.u} = \frac{X_{p.u}}{32} = \frac{8.5}{32} = 0.2656\ p.u$$

ونحسب معاوقة المحرك عند تردد التوافقيات باستخدام العلاقتين :

$$R_n = n\,R$$

$$X_n = n\,X_n$$

درجة التوافقية n	R_n	X_n
1	0.2656	8.5
2	0.5312	17
3	0.7968	25.5
4	1.0624	34
5	1.328	42.5
6	1.5936	51
7	1.8592	59.5
8	2.1248	68.0
9	2.3904	76.5
10	2.6560	85.0
11	2.9213	93.5
12	3.1872	102
13	3.4528	110.5

ثم نبدأ فى تجميع المعاوقات

١ - محصلة Z_C , Z_M على التوازى

$$= \frac{Z_M Z_c}{Z_M + Z_c}$$

للتوافقية الأولى

$$= \frac{(0.2656 + j\,8.5)(-j111)}{0.2656 + j\,8.5 - j\,111}$$

$$= 0.3115 + j\,9.203$$

درجة التوافقية n	$R_{C,M}$	$X_{C,M}$
1	0.3115	9.203
2	1.1028	24.475
3	8.1729	81.297
4	20.5778	-148.275
5	1.5891	-46.473
6	0.5169	-29.0522
7	0.2451	-21.6414
8	0.1039	-17.426
9	0.088	-14.701
10	0.0516	-11.027
11	0.0402	-10.7491
12	0.0316	-10.1714
13	0.0242	-9.2577

٢ – تضاف للمحصلة السابقة قيمة معاوقة المحول T_2 على التوالى

درجة التوافقية n	$R_{C,M,T2}$	$X_{C,M,T2}$
1	0.4111	10.3982
2	1.2522	26.8664
3	8.3721	84.8826
4	20.8766	-143.4942
5	1.9875	-40.497
6	1.0149	-21.881
7	0.8427	-13.2483
8	0.9007	-7.8644
9	1.0840	-3.9442
10	1.1472	0.925
11	1.2356	2.3981
12	1.6252	4.171
13	1.7174	6.2799

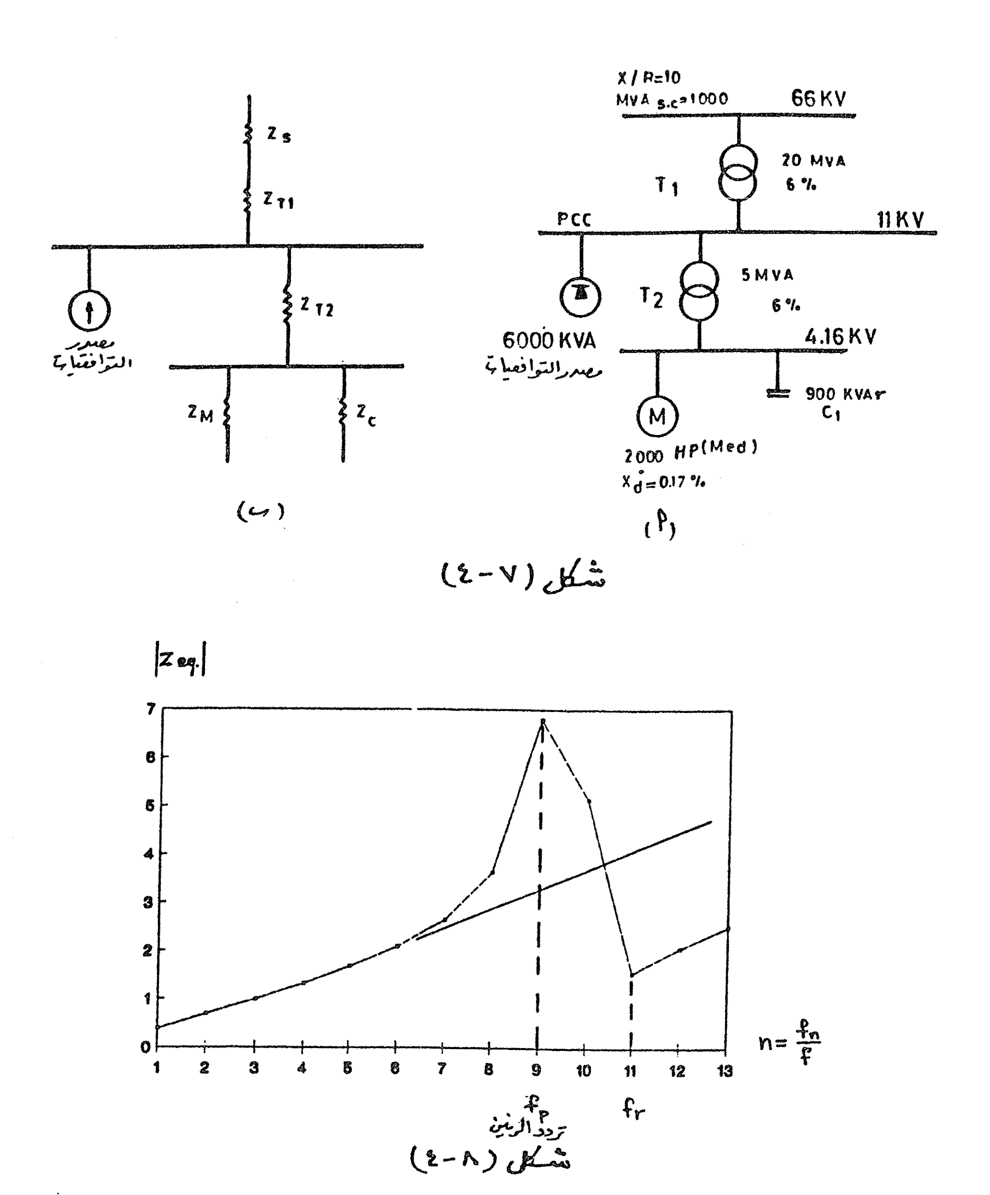
٣ – نحسب محصلة Z_S Z_{T1} على التوالى

درجة التوافقية n	$R_{S,T1}$	$X_{S,T1}$
1	0.025	0.4
2	0.0325	0.7
3	0.04	1.0
4	0.055	1.3
5	0.07	1.6
6	0.085	1.9
7	0.10	2.2
8	0.13	2.5
9	0.160	2.8
10	0.175	3.1
11	0.19	3.4
12	0.25	3.7
13	0.265	4

٤ – نحسب محصلة معاوقات البندين ٢ ، ٣ على التوازى :

درجة التوافقية n	المقاومة المكافئة R_{eq}	الممانعة المكافئة X_{eq}	المعاوقة الكلية Z_{eq}
1	0.0238	0.3802	0.3809
2	0.0202	0.6837	0.6840
3	0.0402	0.9884	0.9892
4	0.0576	1.3114	1.3127
5	0.0793	1.6652	1.6671
6	0.1040	2.0722	2.0748
7	0.1765	2.6307	2.6366
8	0.4622	3.5982	3.6277
9	3.9218	5.5397	6.7874
10	2.7003	4.366	5.1335
11	0.4407	1.4741	1.5386
12	0.4189	2.0086	2.0518
13	0.3588	2.4676	2.4935

نرسم العلاقة بين معاوقة المدخل الكلية للنظام $/Z_{eq}/$ والتردد n كما فى شكل (٤-٨) ونلاحظ فية ان تردد الرنين لهذا المثال عند درجة التوافقية التاسعة .



شكل (٤-٧)

شكل (٤-٨)

الباب الخامس

الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة الكهربائية

للمحافظة على المعدات الكهربائية ومكونات الشبكة الكهربائية من الاثار الناتجة من وجود توافقيات التيار والجهد ، فقد نصت اغلب المواصفات القياسية على الحدود المسموحة للعوامل الآتية :

- عامل تشوه الجهد *(VDF)*
- عامل تشوه التيار *(CDF)*
- عامل تداخل التليفونات *(IT)*

وفيما يلى توضيح الحدود القياسية لكل عامل :

١ - عامل تشوه الجهد *(Voltage distortion factor)*

ان معادلة عامل تشوه الجهد *(VDF)* هى

$$VDF = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n{}^2 \right)^{1/2}$$

حيث

V_1 = جذر متوسط المربعات *(rms)* لجهد المركبة الاساسية

V_n = جذر متوسط المربعات *(rms)* لجهد التوافقية n .

وطبقاً للمواصفات القياسية *IEEE 519 - 1992* فان حدود تشوه الجهد تبعاً لجهود الشبكة ومقاساً عند نقطة الربط المشترك *(PCC)* كما فى جدول (١-٥)

جدول(١-٥)

جهد الشبكة الكهربائية / تشوه الجهد ٪ عند (pcc)	< 69 KV	69 - 161 KV	>161 KV
اقصى تشوه جهد للتوافقيات المنفصلة *Max. for individual harmonics*	3	1.5	1
التشوه الكلى للتوافقيات *(THD)*	5	2.5	1.5

بينما يجب الا يتعدى التشوه الكلى لتوافقيات الجهد فى الشبكات الصناعية عن القيم المسجلة فى جدول رقم (٢-٥) تبعاً لمستوى الجهد وطبيعة الصناعة. وذلك طبقاً للمواصفات .

IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive compensation of static power convertors - 1981 .

جدول(٢-٥)

مستوى الجهد للنظام	شبكة تحتوى على مبدلات	شبكة عامة
الجهد المتوسط *(2.4-69) kv*	*8 %*	*5 %*
الجهد العالى *(> 115 kv)*	*1.5 %*	*1.5 %*

ويوضح جدول (٣-٥) المستويات المناسبة لجهد التوافقيات (كنسبة مئوية من الجهد المقنن للتردد الاساسى) والشبكات الكهربائية للجهود المختلفة وذلك طبقاً للمواصفات القياسية العالمية :

IEC standard 1000 - 2 - 2 1990

Electromagnetic compartibility part 2 : section 2

وطبقاً للمواصفات القياسية لاستراليا *Australian standard As 2279 - 1979*
نتبع القيم الواردة بجدول (٤-٥)

يوضح جدول (٥-٥) قيم توافقيات الجهد طبقاً للمواصفات القياسية لفنلندا

The Finnish power supply authorities, document restriction of Harmonics in Electrical Networks (1978)

وتكون قيم توافقيات الجهد طبقاً للمواصفات القياسية لنيوزيلاندا

The New Zealand Limitation of harmonic levels notice (1981) .

لخطوط جهد ٦٦ ك. ف او الاعلى . تعبيراً عن توافقيات جهد الوجه بالنسبة للجهد المقنن للوجه ، وذلك كما فى جدول (٦-٥) .

جدول(٣-٥)

التوافقيات الزوجية *(even)*			التوافقيات الفردية الثلاثية *(Triplen)* *(odd)*			التوافقيات الفردية الغير ثلاثية *(odd)*		
جهد التوافقية		درجة التوافقية	جهد التوافقية		درجة التوافقية	جهد التوافقية		درجة التوافقية
الجهد العالى *H.V*	الجهد المنخفض LV والجهد المتوسط *MV*	*n*	الجهد العالى *H.V*	الجهد المنخفض LV والجهد المتوسط *MV*	*n*	الجهد العالى *H.V*	الجهد المنخفض LV والجهد المتوسط *MV*	*n*
1.5	2	2	2	5	3	2	6	5
1	1	4	1	1.5	9	2	5	7
0.5	0.5	6	0.3	0.3	15	1.5	3.5	11
0.2	0.5	8	0.2	0.2	21	1.5	3	13
0.2	0.5	10	0.2	0.2	>21	1	2	17
0.2	0.2	12				1	1.5	19
0.2	0.2	>12				0.7	1.5	23
						0.7	1.5	25
						$0.2+\frac{12.5}{n}$	$0.2+\frac{12.5}{n}$	>25

تشوه التوافقيات الكلى *(THD)*
فى شبكات الجهد المنخفض والمتوسط = 8 %
فى شبكات الجهد العالى = 3 %

جدول(٤-٥)

جهد الشبكة	التشوه الكلى للتوافقيات THD %	التوافقيات الفردية %	التوافقيات الزوجية %
التوزيع الابتدائى والثانوى حتى جهد 33 kv	5	4	2
خطوط النقل 22.33 - 66 kv	3	2	1
خطوط النقل 110 kv and above	1.5	1	0.5

جدول(٥-٥)

جهد الشبكة	التشوه الكلى للتوافقيات THD%	مستوى التشوه للتوافقيات المنفصلة (%)
11 kv	5	4
3 - 20 kv	4	3
30 - 45 kv	3	2
110 kv	1.5	1

جدول(٦-٥)

درجة التوافقية الفردية n	حدود الجهد	درجة التوافقية الزوجية n	حدود الجهد
3	2.3	2	1.2
5	1.4	4	0.6
7	1.0	6	0.4
9	0.8	8 - 10	0.3
11	0.7	12 - 50	0.2
13	0.6		
15	0.5		
17 - 21	0.4		
23 - 49	0.3		

وتكون تشوهات الجهد طبقاً للمواصفات البريطانية

Electricity Council (1976) Limits for Harmonics in the United kingdom Electricity supply system

كما فى جدول (٧-٥)

كما أن المستويات المناسبة المقترحة لتوافقيات الجهد بالمصانع *(industrial plant)* طبقاً للمواصفات القياسية *(Draft standard IEC 1000 - 2 - 4 (1992 - 07 - 24)* وهى مقسمة الى الثلاثة اقسام التالية :

- القسم ١ خاص بالبيئة المحمية *(Class 1 : Protected environment)*
- القسم ٢ طبقاً لطبيعة استعمال الشبكات *(Class 2 : utility network condition)*
- القسم ٣ خاص بالبيئة الصناعية *(Class 3 : Industrial environment)*

والموضحة بجدول رقم (٨-٥) ويلاحظ فى هذا الجدول ان محتويات القسم ٢ هى نفسها المواصفات القياسية العالمية *IEC* الموضحة بجدول رقم (٣-٥)

فى جدول (٨-٥) أ ثم عمل مقارنة بين قيم تشوه الجهد للمواصفات القياسية المختلفة والتى يتضح منها ان التشوه الكلى لتوافقيات الجهود المنخفضة والمتوسطة تكون فى حدود ٥ ٪ - ٨ ٪ .

جدول(٧-٥)

جهد الشبكة *kv*	التشوه الكلى لتوافقيات الجهد ٪	تشوه توافقيات الجهد	
		التوافقيات الفردية	التوافقيات الزوجية
0.415	5	4	2
6.6 - 11	4	3	1.75
33 - 66	3	2	1
132	1.5	1	0.5

جدول(٨-٥)

التوافقيات الفردية (odd) الغير ثلاثية				التوافقيات الفردية (odd) الثلاثية				التوافقيات الزوجيـة (even)				التوافقيات البينية inter harmonics			
درجة التوافقية	جهد التوافقية			درجة التوافقية	جهد التوافقية			درجة التوافقية	جهد التوافقية			درجة التوافقية	جهد التوافقية		
n	class 1	class 2	class 3	n	class 1	class 2	class 3	n	class 1	class 2	class 3	n	class 1	class 2	class 3
5	3	6	8	3	3	5	6	2	2	2	3	<11	0.2	0.2	2.5
7	3	5	7	9	1.5	1.5	2.5	4	1	1	1.5	11-13	0.2	0.2	2.25
11	3	3.5	5	15	0.3	0.3	2	6	0.5	0.5	1	13-17	0.2	0.2	2
13	3	3	4.5	21	.2	0.2	1.75	8	0.5	0.5	1	11-19	0.2	0.2	2
17	2	2	4	>21	0.2	0.2	1.0	10	0.5	0.5	1	19-23	0.2	0.2	1.75
19	1.5	1.5	4					>10	0.2	0.2	1	23-25	0.2	0.2	1.5
23	1.5	1.5	3.5									>25	0.2	0.2	1
25	1.5	1.5	3.5												
>25	$0.2+\frac{12.5}{n}$	$0.2+\frac{12.5}{n}$	$5+\sqrt{\frac{11}{n}}$												

التشوه الكلى للتوافقيات *THD*

5 % in class 1
8 % in class 2
10 % in class 3

جدول (٨-٥) أ

المواصفات القياسية / التشـــوه	طبقاً IEEE 519	IEC 1000-2-2		المواصفات القياسية باستراليا	المواصفات القياسية بفنلندا	المواصفات القياسية البريطانية		طبقاً IEC 1000-2-4-1992 المقترحة
	2.3 - 69 KV	L.V-M-V	H.V	UP TO 33 KV	11 KV	0.415 KV	6.6-11 KV	
اقصى تشوه للتوافقيات المنفصلة	3%			الزوجية 2% الفردية 4%	4%	الزوجية 2% الفردية 4%	1.75 % 3 %	
THD	شبكة عامة 5% شبكة تحتوى على مبدلات 8%	8 %	3%	5 %	5 %	5 %	4 %	البيئة المحمية 5% تبعاً لاستعمال الشبكات 8% البيئة الصناعية 10 %

٢ - عامل تشوه التيار *(Current Distortion Factor)*

ان معادلة عامل تشوه التيار *(CDF)* هى

$$CDF = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}$$

حيث :

I_1 = جذر متوسط المربعات *(rms)* لتيار المركبة الاساسية .

I_n = جذر متوسط المربعات *(rms)* لتيار التوافقية n .

يوضح جدول (٩-٥) وشكل (١-٥) حدود تشوه التيار طبقاً للمواصفات القياسية الامريكية *IEEE - 519* للاحمال غير الخطية وللجهود من *2.4kv* وحتى *69kv* وذلك للتوافقيات الفردية . بينما يحدد تشوه التيار للتوافقيات الزوجية بقيمة ٢٥ ٪ من قيمة تشوه التيار للتوافقية الفردية الاعلى .

يستخدم جدول (٩-٥) ايضاً للجهود من *69 kv* وحتى *138 kv* ولكن باستخدام *50%* من القيم الواردة بالجدول .

ويوضح جدول (١٠-٥) حدود تشوه التيار طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية *(Engineering recommendation G5-3 september 1976)*

وتكون حدود تشوه التيار طبقاً للمواصفات القياسية لنيوزيلاندا *The New Zealand Limitation of Harmonic level notice (1981)* للجهود *220 KV* , *110 KV , 66 KV* هى الموضحة بجدول رقم (١١-٥)

بينما تكون مستويات تيارات التوافقية فى المواصفات الفنلندية .

The Finnish power supply authorities document "Restriction of Harmonics in Electrical Networks".

منسوبة الى استهلاك المشترك وليس الى القيمة المطلقة لمستوى التيار عند *pcc* ويحسب هذا التيار من العلاقة الآتية :

جدول(٩-٥)

اقصى تشوه لتيار التوافقية كنسبة من القيمة الاساسية ٪						
I_{sc}/I_L	درجة التوافقية الفردية					THD
	$n<11$	$11<n<17$	$17<n<23$	$23<n<35$	$35<n$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 - 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 - 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

حيث

I_{sc} = أقصى تيار قصر عند pcc .

I_L = اقصى تيار الحمل (للتردد الاساسى) عند pcc .

جدولا(١٠-٥)

درجة التوافقية n / جهد النظام kv	تيار التوافقيات (A rms)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
6.6 - 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

جدول(١١-٥)

درجة التوافقية	حدود تيار التوافقية (بوحدات الامبير - عند الجهد الاسمى للشبكة)		
n	*220 kv*	*110 kv*	*66 kv*
3	5.7	2.9	1.7
5	3.4	1.7	1.1
7	2.5	1.3	0.8
9	1.9	1.0	0.6
11	1.6	0.8	0.5
13	1.4	0.7	0.4
15	1.2	0.6	0.4
17	1.0	0.5	0.3
19 - 21	0.9	0.5	0.3
23	0.8	0.4	0.3
25 - 49	0.7	0.4	0.3
2	2.9	1.5	0.9
4	1.5	0.8	0.5
6	1.0	0.5	0.3
8	0.8	0.4	0.3
10	0.6	0.3	0.2
12,14	0.5	0.3	0.2
16,18	0.4	0.2	0.2
20 - 50	0.3	0.2	0.2

$$I_{ref} = \frac{P_e}{\sqrt{3}\,V}$$

حيث :

V = الجهد الاسمى للنظام

P_e = القدرة المتوسطة فى الساعة للمستهلك *(Consumer's hourly mean power)*

ويوضح جدول رقم (١٢-٥) التشوه الكلى لتيار التوافقيات *(THD)* وتيار التوافقيات المنفصلة .

وطبقاً للمواصفات القياسية *IEEE standard 519 - 1981* فان جدول (١٣-٥) يوضح نسبة تيارات التوافقيات الناتجة من الموحدات *(rectifiers)* ويلاحظ اختلاف القيمة النموذجية عن القيمة النظرية ويرجع هذا الى أن تيار التوحيد لايتحول من حالة الفصل الى حالة التوصيل لحظياً ويوضح شكل (٢-٥) تمثيل بيانى للقيم النموذجية والنظرية فى حالة مبدل ٦ - نبضات.

تخضع الانشاءات المحتوية على مبدلات *(convertors)* فى المواصفات القياسية الفرنسية . لسماحية لكل مشترك عند *pcc* كالآتى :

- تكون التوافقيات الزوجية ٠,٦ ٪ من الاساسية .
- تكون التوافقيات الفردية ١ ٪ من الاساسية
- يكون التشوه الكلى للتوافقيات ١,٦ ٪

وهذا يضمن الا يزيد التشوه الكلى للتوافقيات عند *pcc* عن ٥ ٪ عندما يتصل جميع المشتركين معاً .

ولحساب حجم المبدل *(convertor size)* تستخدم معاوقة التوافقية *(harmonic impedance* من المعادلة الآتية

$$Z_n = \alpha\, n\, Z_{cc}$$

حيث Z_n = معاوقة التوافقية عند نقطة الربط .

جدول(١٢-٥)

تيار التوافقيات ٪	التشوه الكلى لتيار التوافقيات THD %	جهد النظام
8	10	3 - 20 kv
6	7	30 - 45 kv
4	5	110 kv

جدول(١٣-٥)

١٢ نبضة – ثلاثة أوجه		٦ نبضات – ثلاثة أوجه		درجة التوافقية
القيمة النموذجية	القيمة النظرية	القيمة النموذجية	القيمة النظرية	n
2.6	-	17.5	20.0	5
1.6	-	11.1	14.3	7
4.5	9.1	4.5	9.1	11
2.9	7.7	2.9	7.7	13
0.2	-	1.5	5.9	17
0.1	-	1.0	5.3	19
0.9	4.3	0.9	4.3	23
0.8	4.0	0.8	4.0	25

$$Z_{cc} = \frac{V}{S_c}$$

حيث :

Z_{cc} = معاوقة دائرة القصر عند المصدر

V = قيمة الجهد الاساسى (فولت)

S_c = تيار القصر – ثلاثة اوجه (أمبير)

n = درجة التوافقية

α = معامل يؤخذ كالآتى

$\alpha = 2$ فى شبكات الجهد العالى

$\alpha = 3$ فى شبكات الجهد المتوسط

$\alpha = 1$ فى شبكات الجهد المنخفض

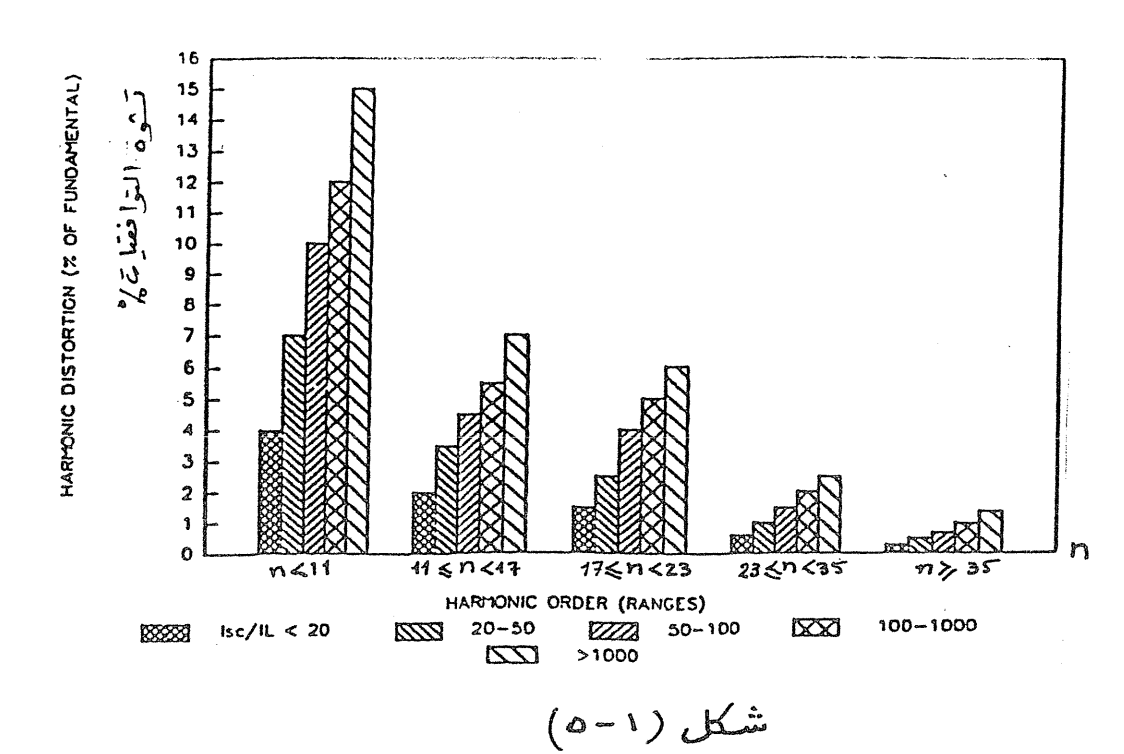
S_n = قدرة المبدل

وتكون القيمة $\frac{S_c}{S_n}$ كما فى جدول رقم (١٤-٥)

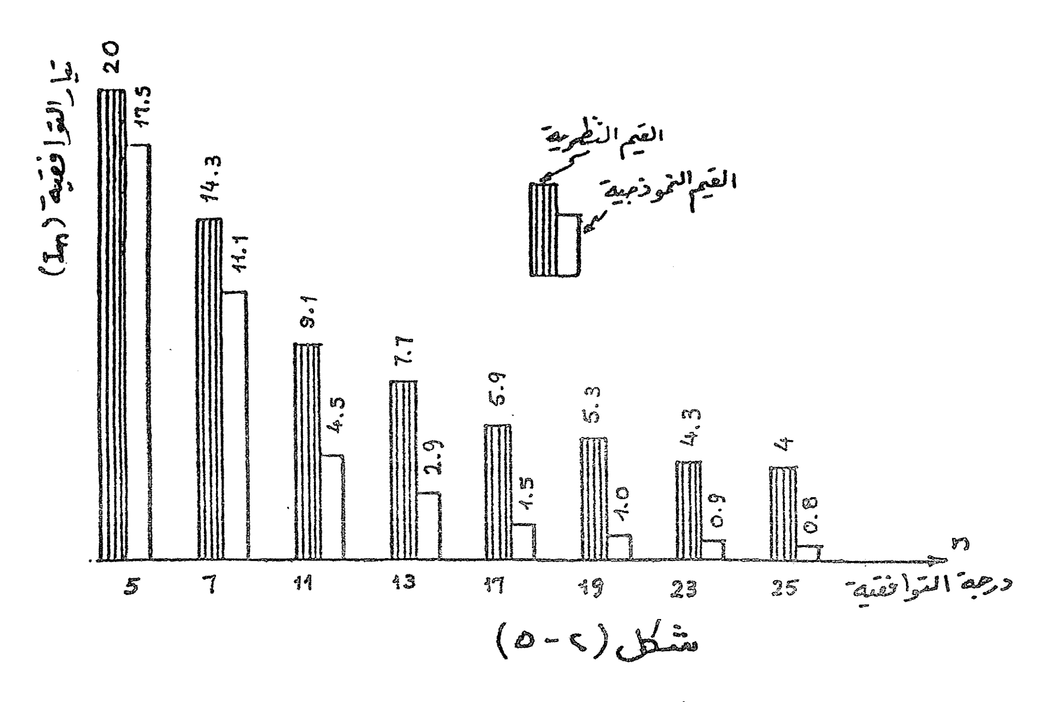
وتحدد المواصفات القياسية السويدية *(Sweden)* حدود قدرة المبدل للجهود حتى ٢٤ ك.ف كما فى جدول (١٥-٦) حيث تسمح بتشوه كلى للتوافقيات *THD* كما فى جدول (١٦-٥)

تحدد المواصفات القياسية الفنلندية *(Finland)* حدود قدرة المبدل للجهود ٢٠ ك.ف، ٣٠ ك.ف كما فى جدل (١٧-٦) .

وفى المواصفات البريطانية *Engineering Recommendation G 5/3* حددت اقصى حجم للمبدلات التى عند توصيلها بالشبكة لايؤخذ فى الاعتبار مستويات التوافقيات الناتجة . وقد سجلت هذه القيم فى جدول رقم (١٨-٥) ولكن إذا زادت الاحجام عن هذه القيم فانها تصدر توافقيات تبعاً للجداول القياسية لتوافقيات التيار والجهد ويكون اقصى حمل للمبدلات احادية الانشاء للحصول على تيارات توافقيات فى الحدود المسموحة مسجلاً بجدول رقم (١٩-٥) تبعاً لجهد الشبكة ولنوع المبدل .


HARMONIC DISTORTION (% OF FUNDAMENTAL)
قوة التوافقيات %
n<11
11 ≤ n <17
17≤ n <23
23 ≤ n <35
n ≥ 35
n
HARMONIC ORDER (RANGES)
Isc/IL < 20
20–50
50–100
100–1000
>1000

شكل (٥-١)


تيار التوافقية (In)
القيم النظرية
القيم النموذجية
20
19.5
14.3
11.1
9.1
4.5
7.7
2.9
5.9
1.5
5.3
1.0
4.3
0.9
4
0.8
5
7
11
13
17
19
23
25
n
درجة التوافقية

شكل (٥-٢)

جدول(١٤-٥)

مبدل ١٢ نبضة	مبدل ٦ نبضات	جهد النظام
150	240	الجهد العالى
225	360	الجهد المتوسط
75	120	الجهد المنخفض

جدول(١٥-٥)

قدرة القصر للنظام ٪	عدد النبضات
0.5	< 6
1.0	6
2.0	12
3.0	> 12

جدول(١٦-٥)

THD %	جهد النظام
4	430 / 250 V
3	3.3 - 24 kv
1	$\leq$ 84 kv

جدول(١٧-٥)

جهد النظام 30 kv	جهد النظام 20 kv	عدد النبضات
-	0.5	< 6
0.5	1	6
1	2	12
2	3	> 12

جدول(١٨-٥)

منظمات تيار متردد ثلاثية الاوجه		مبدلات ثلاثية الاوجه			جهد النظام عند PCC (KV)
٣ ثيريزتوات / ٣ موحد KVA	٦ثيريزتوات KVA	١٢ نبضة KVA	٦ نبضة KVA	٣ نبضة KVA	
10	14	-	12	8	0.415
100	150	250	130	85	6.6 - 11

جدول(١٩-٥)

جهد الشبكة (KV) عند PCC	نوع المبدل	الفترة المسموحة KVA وعدد النبضات المؤثرة المقابلة للانشاءات ثلاثية الاوجه		
		٣ نبضات	٦ نبضات	١٢ نبضة
0.415	بدون تحكم uncontrolled	-	150	300
	تحكم نصفى Half controlled	-	65 *	-
	ذو تحكم Controlled	-	100	150
6.6 - 11	بدون تحكم	400	1000	3000
	تحكم نصفى	-	500 *	-
	ذو تحكم	-	800	1500
33	بدون تحكم	1200	3000	7600
	تحكم نصفى	-	1200 *	-
	ذو تحكم	-	2400	3800
132	بدون تحكم	1800	5200	15000
	تحكم نصفى	-	2200 *	-
	ذو تحكم	-	4700	7500

* بالنسبة الى قناطر نصف تحكم ٣ ديود / ٣ ثيريزتور .

حدود تيار وجهد التوافقيات للجهد المنخفض

(طبقاً للمواصفات العالمية القياسية *IEC 555 -2*)

للمعدات احادية الوجة والجهد المقنن ٢٢٠ – ٢٦٠ فولت والتردد ٥٠ هرتز فان القيم القياسية للنسبة المئوية لاقصى جهد توافقية *(Maximum voltage Harmonic ratios)* تبعاً لدرجة التوافقية موضحة فى الجدول رقم (٢٠-٥)

جدول(٢٠-٥)

النسبة المئويةلاقصى جهد التوافقية ٪ *Maximum voltage harmonic ratios %*	درجة التوافقية *Harmonic order*
التوافقيات الفردية *(odd)*	
0.85	3
0.65	5
0.6	7
0.4	9
0.4	11
0.3	13
0.25	15 - 39
التوافقيات الزوجية *(even)*	
0.3	2
0.2	4 - 40

ونحصل على حدود تيار التوافقيات باستخدام الجدول رقم (٢٠-٥) وبافتراض ان المعاوقة الداخلية *(internal impedance)* (والتى تعرف ايضاً بمعاوقة الاسناد *(reference impedance)* عند كل تردد توافقية تساوى

$$Z_{ref} = (0.4 + jn\, 0.25)\ \Omega$$

حيث n درجة التوافقية

ويوضح جدول(٢١-٥) اقصى تيار توافقية مسموح لكل درجة توافقية

جدول(٢١-٥)

درجة التوافقية *harmonic order*	اقصى تيار توافقية مسموح به (امبير) *Max. permissible harmonic current (A)*
التوافقيـــات الفرديـــة	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21
15 - 39	$0.15\left(\frac{0.15}{n}\right)$
التوافقيـــات الزوجيـــة	
2	1.08
4	0.43
6	0.3
8 - 20	$0.23\left(\frac{8}{n}\right)$

ولاتعتبر قيم نسبة أقصى جهد توافقية وقيم المعاوقة الداخلية لقيم نموذجية بنظام توزيع الجهود المنخفضة ، ولكن تستخدم للاسترشـــاد وادراك الاضطرابات نتيجة المعدات .

٣ - تداخل التليفونات *Telephone Interference*

يدل هذا العامل عن الاضطرابات الحادثة فى خطوط التليفونات ويعبر عنه بالمعادلة العامة التالية .

$$IT = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_n W_n)^2}$$

حيث :

I_n = قيمة جذر متوسط المربعات *(rms)* لتيار التوافقية *n* المار بالشبكة

W_n = عامل تأثير التليفون *(TIF)* او عامل الوزن والذى يعتمد على الترددات .

ويوضح جدول (٢٢-٥) العلاقة بين التردد (لشبكة *60 Hz*) وعامل تأثير التليفون تبعاً للمواصفات القياسية العالمية *IEEE 519 - 1981* .

جدول(٢٢-٥)

f	W_n	f	W_n	f	W_n	f	W_n
60	8.5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3380	8890
360	400	1260	6050	2160	9880	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6650	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10680	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10218	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9020	4980	840

الباب السادس
قياس التوافقيات
Harmonic Measurements

ان وجود التوافقيات فى الشبكة الكهربائية مؤكد نتيجة طبيعية الاحمال الصناعية ، ولكن هل هى فى حدود القيم المسموحة عالمياً او اكبر . وهل يوجد اكثر من مصدر للتوافقيات على قضبان الربط المشتركة *(pcc)* . وهل سيتم اضافة احمال مصدرة للتوافقيات على نفس القضبان مستقبلاً وعموماً وفى حالة وجود اكثر من مصدر للتوافقيات فان تيارات التوافقيات تجمع اتجاهياً وحيث ان قيمة وزاوية كل توافقية تكون منسوبة الى المركبة الاساسية . فانهما سوف يتغيرا مع تغير الاحمال . ولذلك فإنه من الصعب جداً التنبؤ بقيم التوافقيات او التشوه الحادث فى موجات الشبكات الكهربائية .

علماً بان القياس هو افضل الطرق لتحديد التوافقيات بالشبكات الكهربائية .

وفى هذا الباب سنتعرض لفكرة مبسطة عن أجهزة قياس التوافقيات او محللات التوافقيات *(Harmonic Analysers)* كما سنذكر بعض امثلة لهذه الاجهزة والتى يمكن ان تقيس توافقيات التيار والجهد عند كل توافقية ، كما تقيس التشوه الكلى للتيار والجهد . وهذه الاجهزة اما ان تكون احادية الوجه او ثلاثية الاوجه . ومعظمها لها درجة دقة عالية جداً .

وقد تطورت أجهزة محللات التوافقيات *(Harmonic Analysers)* تطوراً كبيراً جداً فى الآونة الاخيرة نتيجة التقدم الكبير فى صناعة الالكترونيات ، وفيما يلى امثلة من الاجهزة القديمة والحديثة .

يوضح شكل (١-٦) مثالاً لمكونات محلل توافقيات من الطرازات القديمة حيث يتم من خلاله قياس قيمة التوافقيات المختلفة الموجودة فى موجة المدخل بطريقة مباشرة ويتكون الجهاز من :

- دينامومتر غير استاتيكى *(astatic dynamometer)* يحتوى على ملفين احدهما الملف المتحرك *(moving coil)* والذى يمر به تيار يتناسب مع الجهد المراد قياس توافقياته وملف ثابت *(Fixed coil)* يمر به التيار I_a والذى يعرف بتيار

التحليل (analysing current) ويتغير ترددة بحيث يساوى التردد الاساسى او تردد التوافقيات الموجوده فى الموجة المقاسة . ونحصل على التردد المتغير باستخدام محرك المتزامن (synchronous motor)،يقوم بتشغيل قرص التلامس الذى يحتوى على مجموعة من نقط التلامس على شكل حلقات مركزية ، حلقة لكل توافقية ، وتكون نقط التلامس كافية لعدد التوافقيات المطلوب قياسها ، ويرتبط القرص بصمام ثلاثى (triode valve) ، ويتحول التيار I_a الى آنود (Anode) الصمام من خلال محول ربط . ويمكن قياس التوافقيات الفردية حتى الدرجة الخامسة والثلاثين .

وعند تساوى تردد تيارى الملفين الثابت والمتحرك فان انحراف الدينامو يستقر .

وتكون معادلة التيار المار بالملف المتحرك هى :

$$i = I_0 + I_1 \sin(\theta + \Phi_1) + I_2 \sin(2\theta + \Phi_2) + I_3 \sin(3\theta + \Phi_3) + \ldots\ldots\ldots\ldots + I_n \sin(n\theta + \Phi_n)$$

ويعبر عن التيار i_a كالآتى :

$$i_a = I_a \sin(m\theta + \Phi_a)$$

اى ان التيار i_a له تردد التوافقية رقم m

ويتناسب العزم اللحظى T مع i_a , i

$$T \;\alpha\; i\, i_a$$

ويكون متوسط العزم T_m

$$T_m \;\alpha\; \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i\, i_a \, d\theta$$

وبالتعويض عن قيمتى i_a , i تصبح معادلة T_m كالآتى

$$T_m \;\alpha\; \frac{I_a I_m}{2} \cos(\Phi_m - \Phi_a)$$

$$\alpha\; I_a' \; I_m' \cos(\Phi_m - \Phi_a)$$

$$or \quad D' = K\; I_a' \; I_m' \cos(\Phi_m - \Phi_a)$$

حيث D' = أنحراف الديناموميتر ويتناسب مع T_m .

I_a' = جذر متوسط مربعات (rms) تيار التحليل

I_m' = جذر متوسط مربعات *(rms)* تيار التوافقية m بالملف المتحرك

K = ثابت المعايره للدينامومتر .

يتم تغيير زاوية التيار I_a بتدوير حامل الفرش *(brush arm)* على القرص حتى نحصل على $\Phi_a = \Phi_m$ وعندئذ نحصل على اقصى انحراف

$$D'_{max} = K \; I_a' \; I_m'$$

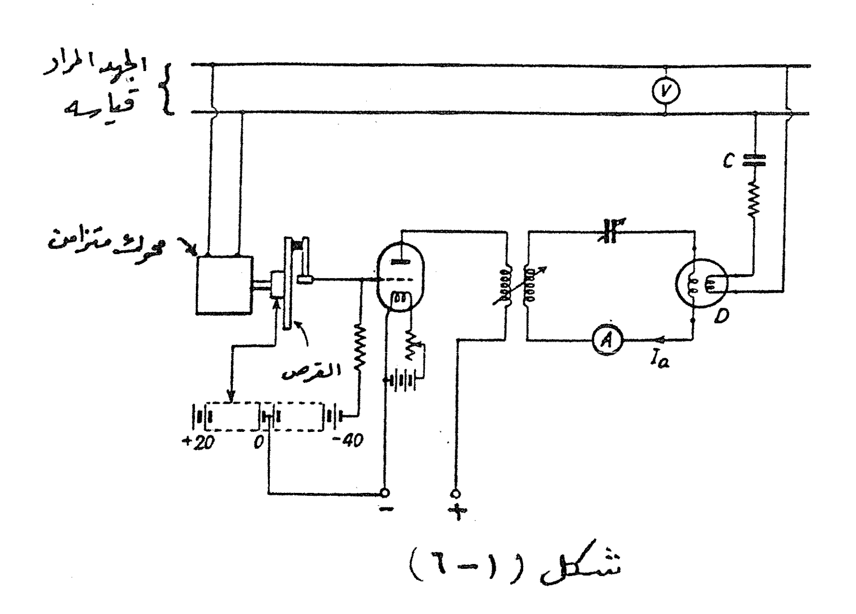
وتكون قيمة التوافقيات كنسبة من الجهد الاساسى المقاس بالفولتميتر *(v)* .

وتعتمدالاجهزة الحديثة على وجود مرشح (او مرشحات) امرار الترددات العالية *(High pass filter)* لعزل التوافقيات عن المركبة الاساسية ولقياس كل من المركبة الاساسية والتوافقيات ، ويوضح شكل (٢-٦) تمثيلاً لمحلل التوافقيات باستخدام مرشح *(F)* ويكون عامل التشوه *(Distortion Factor)* هو النسبة بين جذر متوسط المربعات للكميتين V , V_n اى ان : $D = V_n / V$

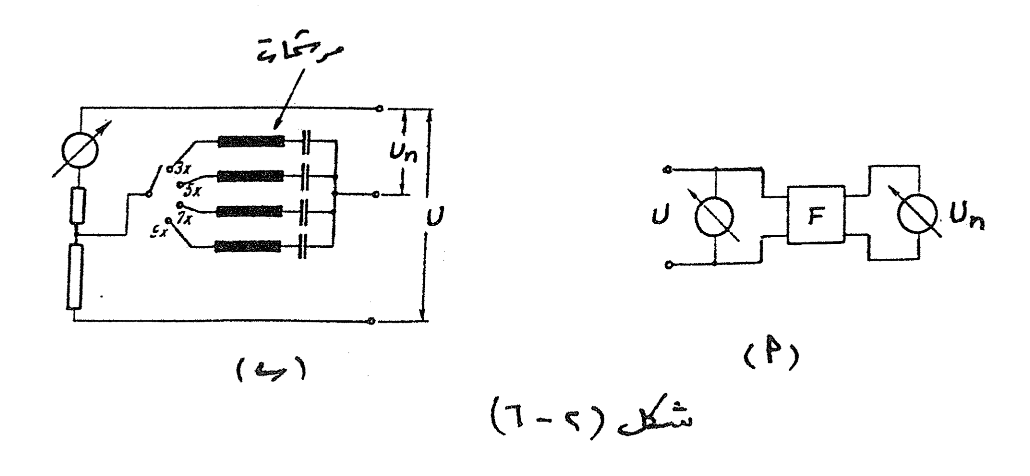
ويوضح شكل (٢-٦) ب تمثيل توضيحى لمحلل التوافقيات لقياس التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة والتاسعة من خلال مرشحات توالى ويتم قياس جهد المدخل من خلال فولتميتر ، وتقاس التوافقيات كنسبة من المركبة الاساسية .

ويوضح الشكل (٣-٦) نوعاً آخر من محلل التوافقيات باستخدام مكبر رفض *(rejection amplifier)* يتكون من قنطرة "وين" *(Wein Bridge)* ومكبرين *(amplifiers)* ويكون مخرج مكبر الرفض عبارة عن التوافقيات الموجودة فى موجة المدخل . وتحتوى دائرة مكبر الرفض على مرحلتين للتكبير من خلال مكبر متقدم *(Preamplifier)* ومكبر قنطرة *(Bridge amplifier)* ، وتعمل قنطرة "وين" كمرشح ، ويحدث اتزان القنطرة عند تردد واحد فقط .

وعند حدوث الاتزان ينتج اقل جهد مخرج . وتولف مكونات القنطرة عند التردد الاساسى المطلوب . ويمثل الكاشف الصفرى *(Null detector)* بالمفتاح s . عند توصيل المفتاح s فان موجة المدخل تمر من خلال R_1 , R_2 ويقرأ العداد موجه المدخل (المركبة الاساسية والتوافقيات) بينما عند فتح s فان العداد يقرأ التوافقيات فقط . ويمكن التحكم فى تدريج قراءة العداد عن طريق مقاومة التحكم فى دائرة المدخل .


الجهد المراد قياسه
V
C
محرك متزامن
القرص
D
A
I_a
+20
0
-40
-
+

شكل (١ - ٦)


مرشحات
U_n
U
3x
5x
7x
F
(ب)
(أ)

شكل (٢ - ٦)

عموماً تصنف اجهزة قياس التوافقيات الى النوعين التاليين :

- المحلل الطيفى *Spectrum analyser*

يعمل هذا المحلل لمدى ترددات محددة ، حيث يقيس قيمة الاشارة *(Signal amplitude)* عند كل الترددات خلال هذا المدى . وعند قياس التوافقيات يجب ان تكون ترددات التوافقيات محددة بالنسبة للتردد الاساسى لنفس الموجة .

- محلل التوافقيات *Harmonic analyser*

هذا المحلل يقيس قيمة الاشارة عند ترددات التوافقيات فقط وتقاس الترددات بالنسبة للتردد الاساسى ويجهز محلل التوافقيات بطيف مخرج *(output spectrum)* وهو عبارة عن مجموعة فرعية معينة لقيمة اشارة الطيف المنتجة بواسطة المحلل الطيفى الذى يغطى فقط مدى التردد المحتوى على التوافقيات .

ويوضح شكل (٤-٦) تمثيلاً لموجة مدخل مشوهه للمحلل (على محورى الزمن والقيمة) ومخرج المحلل وهو عبارة عن قيمة التوافقيات عند ترددات التوافقيات (على محورى التردد والقيمة) ، مع تمثيل الموجات على الثلاثة محاور معاً (الزمن ـ القيمة ـ التردد).

وتعتبر المرشحات من المكونات الرئيسية للمحللات لذلك سنتعرض لبعض انواعها .

يوضح شكل (٥-٦) أ خاصية مرشح امرار نطاقى *(Band pass filter)* نموذجى له مدى نطاق *(Bandwidth)* يساوى

$$B = f_u - f_l$$

بينما يوضح شكل (٥-٦)ب ، الخاصية الحقيقية لمرشح الامرار النطاقى .

مرشحات التحليل الطيفى

يستخدم نوعين من المرشحات فى التحليل الطيفى هما :

- مرشح ذو عرض نطاق مطلق ثابت *Constant absolute bandwidth filter*

- مرشح ذو عرض نطاق مئوى ثابت *Constant percentage bandwidth filter*

يعبر عن تردد المركز *(center frequency)* لمرشح ذى عرض نطاق مطلق ثابت

بالمعادلة :

$$f_c = \frac{f_l + f_u}{2}$$

حيث :

f_l= اقل تردد للمرشح

f_u= اعلى تردد للمرشح

يحدد هذا المرشح عرض النطاق B_a لموجة المدخل بغض النظر عن تردد المركز ويفضل استخدام هذا النوع لقياس التوافقيات حيث انه يحافظ على نفس الثبات ويحدث فصل للتوافقيات عند كل تردد على الرغم من انخفاض مدى التردد .

بينما يعبر عن تردد المركز لمرشح ذى عرض نطاق مئوى ثابت من المعادلة :

$$f_c = \sqrt{f_l f_u}$$

وهذا النوع عبارة عن مرشح له ثابت Q،واما عرض النطاق B_p لموجة المدخل فيخضع للمعادلة الآتية :

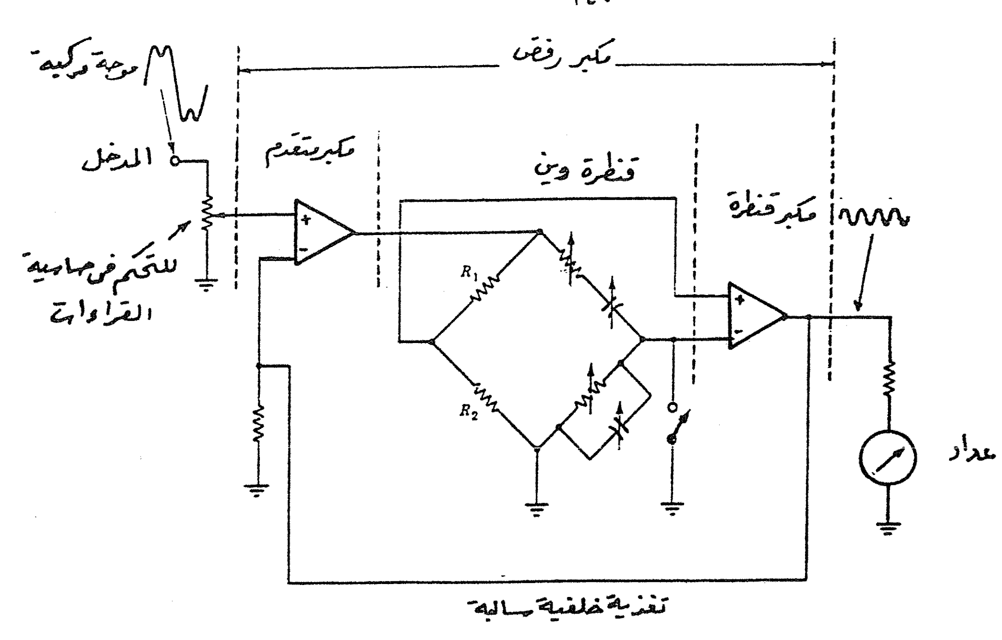
$$B_p / f_c = constant$$

ويوضح شكل (٦-٦) العلاقة بين مدى النطاق للمرشحين المطلق والمئوى فى حالة التدريجين الخطى واللوغرتمى .

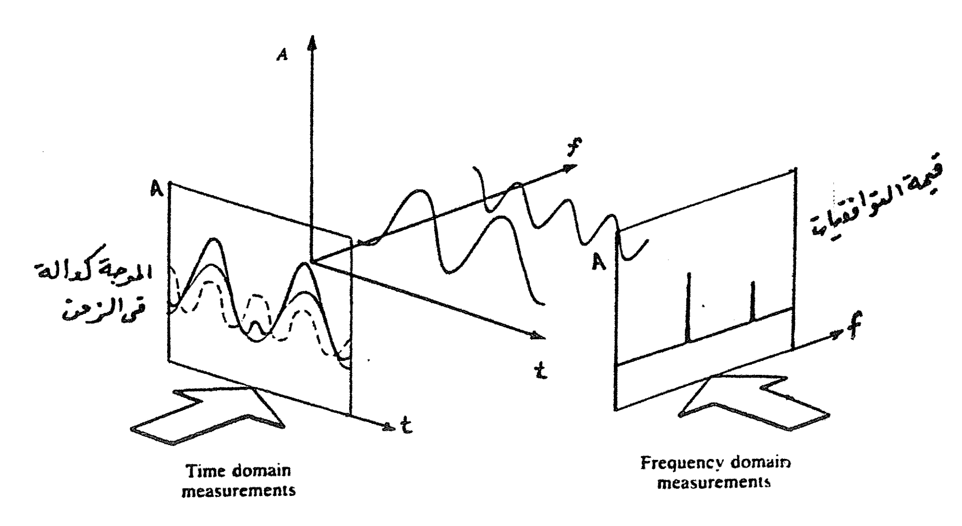
وفى شكل (٧-٦) تتضح العلاقة بين التردد وعرض النطاق للمرشحين المطلق والمئوى وعلى سبيل المثال ، لتحليل التوافقيات فى شبكة ترددها ٥٠ هرتز باستخدام نوعى المرشحين المطلق والمئوى مع العلم ان لكل من المرشحين عرض نطاق يساوى $10\ Hz$ (ويكون تردد المركز عند $\pm 5\ Hz$) عند التوليف للتردد الاساسى . وعلى ذلك فعند التوافقية العشرين (اى عند التردد $20 \times 50 = 1000\ Hz$) يكون عرض النطاق كالآتى :

- لمرشح ذى عرض نطاق مطلق ثابت = $10\ Hz$
- لمرشح ذى عرض نطاق مئوى ثابت = $200\ Hz$

وهكذا فان عرض النطاق للمرشح المئوى يشمل كل التوافقيات من الثامنة

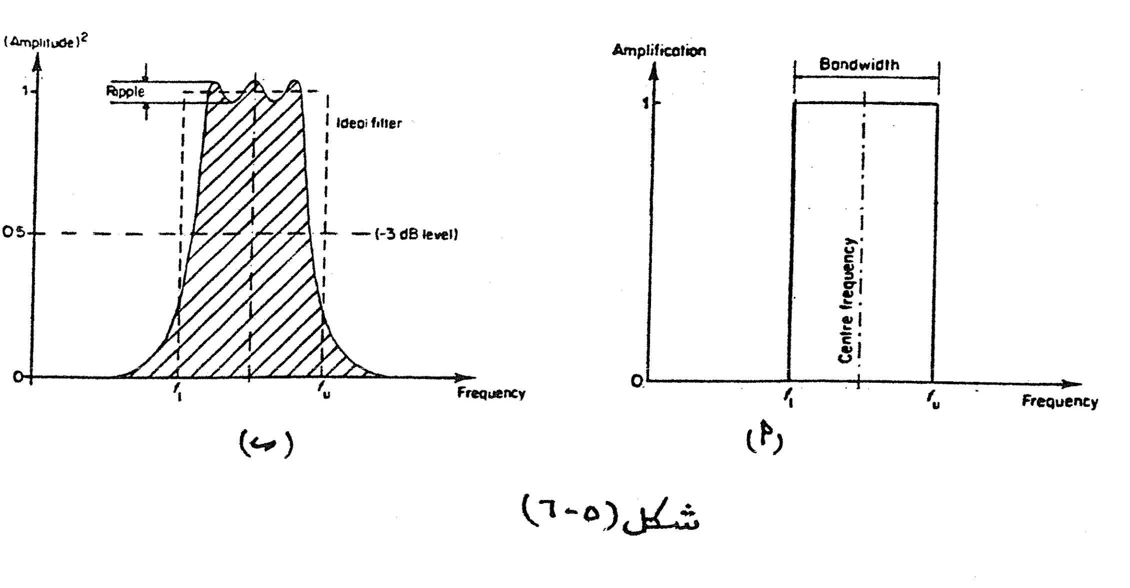


شكل (٣-٦)

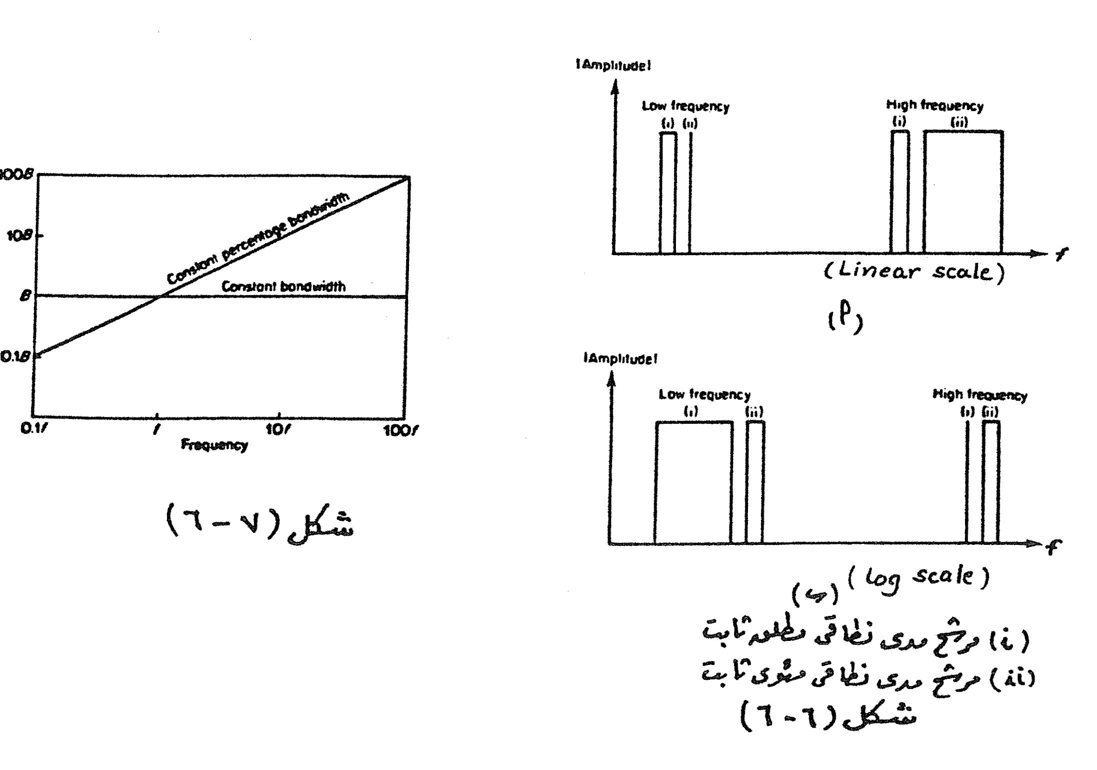


شكل (٤-٦)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



شكل (٦-٥)



شكل (٧ - ٦)

(i) مرشح مدى نطاقي مطلق ثابت
(ii) مرشح مدى نطاقي مئوي ثابت

شكل (٦-٦)

عشـــر (900 Hz) الى الثانية والعشرين (1100Hz) .

وبهذا يتميز نوع المرشح بعرض نطاقه ، وبالاضافة الى معرفة عرض النطاق للمرشح فيجب معرفة خاصيتين اخريتين هما : الانتقائية (selectivity) وزمن الاستجابة (response time) ، وتعرف الانتقائية بدرجة مقدرة المرشح على فصل المركبات للترددات المختلفة ويعبر عن الانتقائية بعامل الشكل (shape factor) . ويعرف هذا العامل ، للمرشحات ذات عرض النطاق الثابت ، من العلاقة :

$$\text{عامل الشكل} = shape\,factor = \frac{B_{60}}{B_3}$$

حيث :

B_{60} = عرض نطاق المرشح عند توهين (attenuation) يساوى 60 dB .

B_3 = عرض نطاق المرشح عند توهين يساوى 3dB

ونلاحظ فى شكل (٨-٦) توضيح للعلاقة بين عرض النطاق والتوهين .

ويمكن استخدام B_{40} بدلاً من B_{60} اذا كان الشكل لايحتوى على B_{60} .

وللمرشحات ذات عرض نطاق مئوى ثابت يستخدم انتقائية الثُمانى (Octove selectivity) وهو عبارة عن التوهين عند الثمن (octove) على اى من جانبى مركز التردد .

ويحتاج المرشح لفترة زمنية لكى يستجيب حيث ان استجابتة لاتكون لحظية وذلك للتغير الحادث فى مستوى موجة المدخل . كما ان الزمن الحقيقى المطلوب لوصول اشارة المخرج للمستوى النهائى لحالة الاستقرار يساوى $\left(\frac{1}{B}\right)$ حيث :

B = عرض النطاق للمرشح

بمعنى آخر فانه يعبر عن الاستجابة كالآتى

عرض النطاق (B) x زمن استجابة المرشح $(T_f) \simeq 1$

اى ان :

$\therefore \; BT_f \simeq 1$

ويعرف عرض النطاق النسبى b_r (Relative band width) كالآتى :

حيث :

$$b_r = B / f_c$$

f_c= مركز التردد للمرشح

وان عدد الدورات n_f (number of cycles) الموجودة فى زمن الاستجابة هى

$$n_f = f_c T_f$$

وباستخدام المعادلات الثلاثة السابقة نحصل على العلاقة $b_r n_f \simeq 1$

الطيف النظيرى وقياسات التوافقيات

تعتمد فكرة الطيف النظيرى (Analogue spectrum) على استخدام المرشحات النظيرية لعزل التوافقيات من موجة المدخل الرئيسية .

ونحتاج الى العلاقتين التاليتين:

أ - جذر متوسط المربعات (rms) لاشارة المدخل:

$$y_{rms} = \left\{ \frac{1}{T} \int_{t-\tau}^{t} [\, y(\tau)\,]^2 \, d\tau \right\}^{1/2}$$

ب - توحيد اشارة مخرج المرشح . وتكون القيمة المتوسطة (average) للاشارة

هى :

$$y_{av} = \frac{1}{T} \int_{t-\tau}^{t} | \, y(\tau) \, | \, d\tau$$

وتوجد انواع مختلفة من محللات التوافقيات والطيف النظيرى نذكر منها :

١ - **محللات المرشحات المنفصلة** (Discrete Filter analysers)

او المحللات ذات مجموعة المرشحات (Bank of filter analysers)

ويتكون المحلل من :

- مجموعة من المرشحات $F_1, F_2 \ldots, F_k \ldots, F_N$ ، ويولف (Tuned) كل مرشح عند مركز التردد (f_c) لمدى التردد المحدد .

- مكبر *(amplifier)* لاشارة مدخل المحلل .
- كاشف *(Detector)*
- مكبر *(Amplifier)* لأشارة مخرج الكاشف .

ويوضح شكل (٩-٦) أ المكونات الرئيسية للمحلل . ويوضح شكل (٩-٦) ب مخرج المحلل بدلالة مركز تردد التوافقية . واذا كانت المرشحات مثالية فاننا نحصل على مخرج له عرض ثابت (عرض النطاق) كالموضح فى شكل (٩-٦) أ وبالتالى فان المخرج المثالى للمحلل عبارة عن خط افقى بطول التوافقية وعند مركز تردد التوافقية ويعتبر هذا النوع غير دقيق نظراً لأن الموجات تكون غير مستقرة .

٢ - **محللات التوازى** *(Parallel Analysers)*

فى هذا النوع يتكون كل مرشح توافقية من دائرة عبارة عن : مرشح ـ كاشف ـ مكبر مخرج ، وتكون عدد الدوائر بعدد التوافقيات المراد قياسها وهذه الدوائر متصلة على التوازى كما فى شكل (١٠-٦) وتغذى من مكبر مدخل . وتتصل مخارج هذه الدوائر بشاشة مخرج متعددة *(Multiple output display)* .

الطرق الرقمية للتحليل الطيفى

يستخدم تحويل "فورير" المنفصل *(Discrete Fourier Transform)* للحصول على التحليل الرقمى . وتكون العلاقة العامة لتحويل فورير المنفصل هى

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)\ x(n)\ e^{-j2\pi kn/N} \qquad 0 < k < N-1$$

حيث

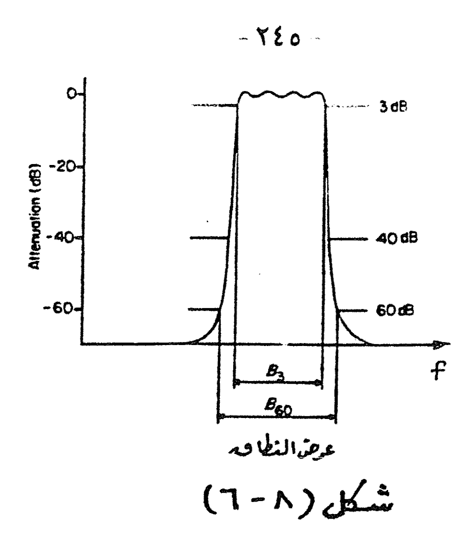
$w(n)$ = المسافة المتماثلة لعينات نافذة الزمن *(time window)*

(لاحظ تعريف نافذة الزمن من شكل (١١-٦))

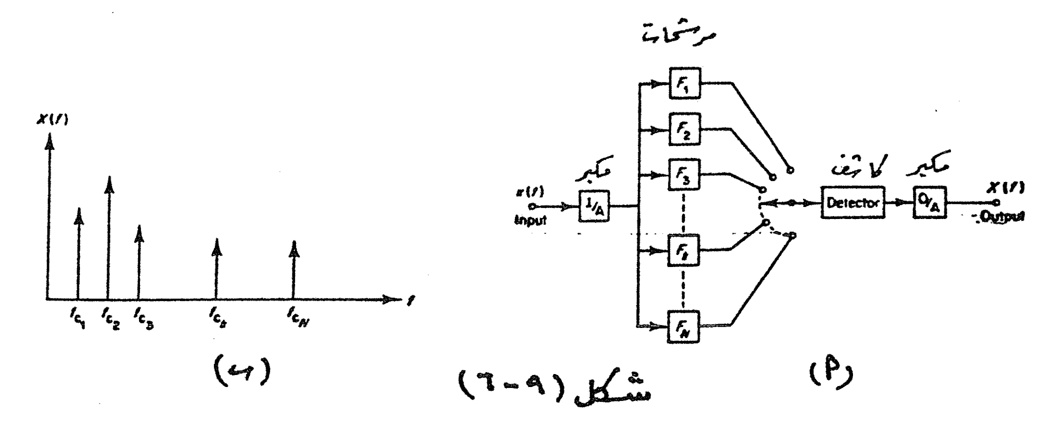
$x(n)$ = المسافة المتماثلة لعينات الموجة

N = عدد العينات الموجودة فى النافذة والموجة خلال طول النافذة .

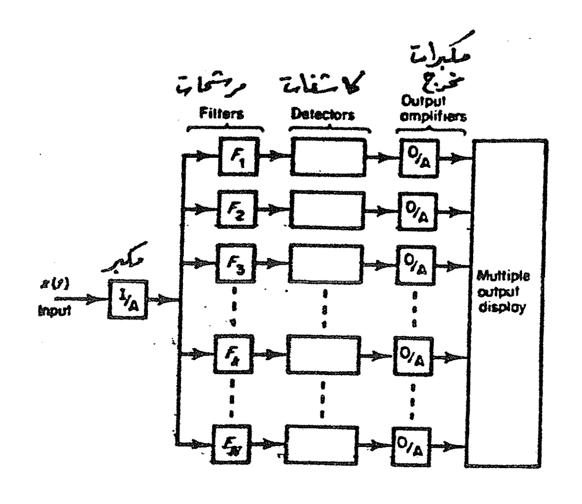
تحسب المعادلة السابقة باستخدام طريقة تحويل "فورير" السريع *(Fast Fourier Fast)*



شكل (٨-٦)



(ب) شكل (٩-٦) (أ)



شكل (١٠-٦)

وذلك بأفتراض ان *(Transform*

$$N = 2^{m}$$

حيث m رقم موجب ، نموذجياً يستخدم $m = 10$ وبالتالى تكون

$$N = 1024$$

وبعمل تحويل عكسى للمعادلة السابقة نحصل على

$$w(n)\ x(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X(k)\, e^{j2\pi kn/N} \qquad 0 \le n \le N-1$$

ولو افترضنا ان $w(n) = 1$ لجميع قيم n فانه يمكن الحصول على معاملات سلسلة فورير *(Fourier - series coefficient)* لموجة المدخل ، اى نحصل على $x(n)$.

تعتمد المحللات الرقمية على تحويل الموجة النظيرية (على محور الزمن) *(Time domain analogue signal)* الى سلسلة من البيانات الرقمية (على محور التردد)*(Digital data on frequency domain)* ، كما فى شكل (١٢-٦)

وللحصول على ذلك يحتوى المحلل على مبدل نظيرى / رقمى *(Analogue to digital converter)* والذى يرمز له عادة بالرموز *(A/D)* ويتحكم فى عملية التحويل عدد خوينات *(bits)* المبدل . فمثلاً مبدل *(10-Bit A/D)* عشرة خوينات اى يستعمل *1024* مستوى لتمثيل اشارة تتغير من *0* إلى *V* .

علماً بأن أصغر تغيير فى قيمة الاشارة يساوى $\frac{V}{1024}$ (والذى يكون قادراً على التسجيل عند مخرج المبدل) وهذا يمثل الحد الديناميكى *(Dynamic range)* لحــــوالى *60 dB* .

ومن الناحية العملية تستخدم بتوسع مبدلات ١٢ خوينة *(12-Bit A/D)* وتعطى حد ديناميكى حوالى *72 dB* ويوضح شكل (١٣-٦) تحويل اشارة نظيرية الى سلسلة رقمية على مستويات بينهما ΔV ، وينتج عن ذلك خطأ يعرف بخطأ الكمية *(Quantizing error)* والذى يتغير بين $\pm 1/2$ من اقل خوينة *(Least significiant bit)* . ويقل خطأ الكمية كلما زاد عدد خوينات المبدل .

تمثيل بيانات التوافقيات :

أ - فى حالة استخدام محللات التوافقيات النظيرية فانها تحتاج لعدة دقائق للحصول على بيانات التوافقيات والتى تتكرر على مسافات ثابتة .

ويمكن تمثيل التوافقيات (مخرج المحلل) على شكل جدول بيانات او تمثيل فى صورة شكل بيانى *(chart)* . ويوضح جدول (١-٦) بيانات مخرج محلل نظيرى

جدول(١-٦)

التـــردد *f* *(Hz)*	القيمـــة *(v)*
50	240.0
100	0.1
150	12.0
200	0.1
250	2.7
300	0.0
350	2.1
400	0.0
450	0.3
500	0.0
550	0.6
600	0.0
650	0.4
700	0.0
750	0.3
800	0.0
850	0.2
900	0.0
950	0.1
1000	0.0

ونحصل على البيانات ايضاً على شكل بيانى كما فى شكل (١٤-٦) وله مركبة اساسية 240 v (وهى تقابل 0 dB) ومدى النطاق للمرشح 3Hz ، ومعدل المنحنيات (Sweep rate) يساوى 5 Hz /s ومن الشكل البيانى نستنتج ان جمع البيانات قد تم على فترات زمنية كبيرة ، والتى يمكن ان تؤدى الى مشاكل عند عمل التحليل .

فمثلاً فى شكل (١٥-٦) سجل تيار التوافقية السابعة مع الزمن ، فاذا سجلت هذه التوافقية كل ١٢ دقيقة فمعنى ذلك ان النتيجة ستختلف اذا ما أختلفت فترة التسجيل وهذا يعطى دلالة لاختلاف النتائج تبعاً لفترة التسجيل .

ب - فى حالة استخدام محللات التوافقيات الرقمية نحصل على مخرج عبارة عن قيم (أو نسب)التوافقيات عند درجات التوافقيات المختلفة ويوضح شكل (١٦-٦) الشكل البيانى لمخارج هذه المحللات ، ففى شكل (١٦-٦) أ مثلت التوافقيات كنسبة مئوية للقيم الخطية (Linear amplitude %) بينما مثلت قيم التوافقيات فى شكل (١٦-٦) ب كقيم لوغاريتمية مئوية (Logarithmic amplitude %) حيث التدريج الكلى يساوى 110 V . وعند التوافقية الخامسة ، اى التردد 250 Hz ، تكون القيمة 10.33 V . ويوضح شكل(١٦-٦)جـ تمثيل لوغاريتمى للجهد والتيار وفية يكون التدريج الكلى للجهد يساوى 110 V والتيار 2A ويكون تيار التوافقية 0.33 بينما جهد التوافقية يساوى 10.33 V .

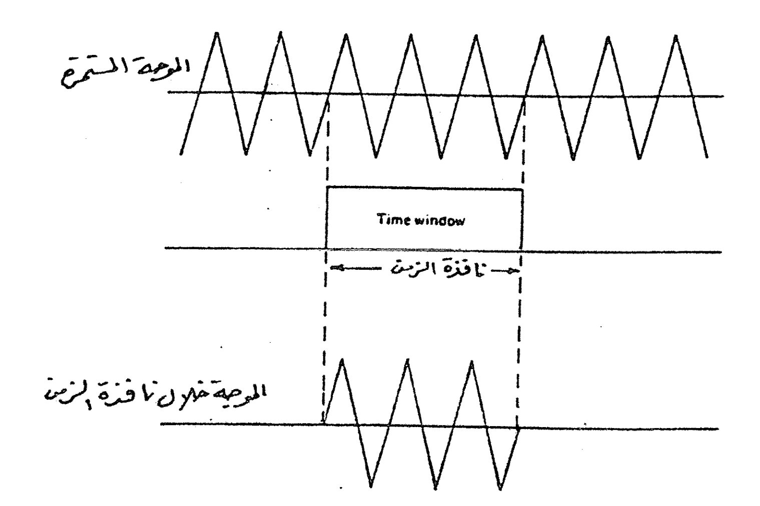
توجد محللات التوافقيات لقياس توافقيات التيار والجهد لوجه واحد او للثلاثة أوجه ومسار التعادل .

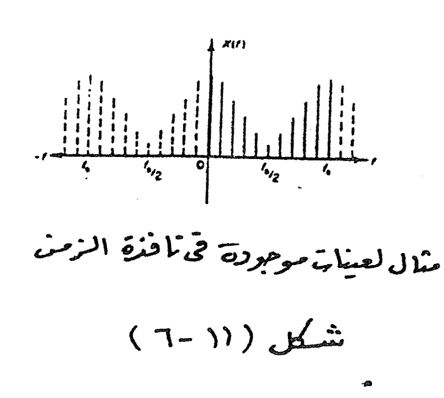
ويوضح جدول (٢-٦) القياسات الناتجة باستخدام محلل توافقيات صناعة ايطالية للثلاثة اوجه R,S,T حيث يسجل الجهاز لكل وجه البيانات التالية :

الجهد (V) ، التيار (A) ، تشوه الجهد (DV%) ، تشوه التيار (DI%) ، التردد (HZ) ، كذلك يسجل لكل توافقية (n) الآتى : قيمة الجهد - نسبة الجهد - قيمة التيار - نسبة التيار - جيب تمام الزاوية .

بينما يوضح الشكلان (١٧-٦) أ،ب مثالان أخران لقياس تيار التوافقيات لأحد الأوجه ومسار التعادل (الارضى)قيست بجهاز محلل التوافقيات الايطالى الصنع .

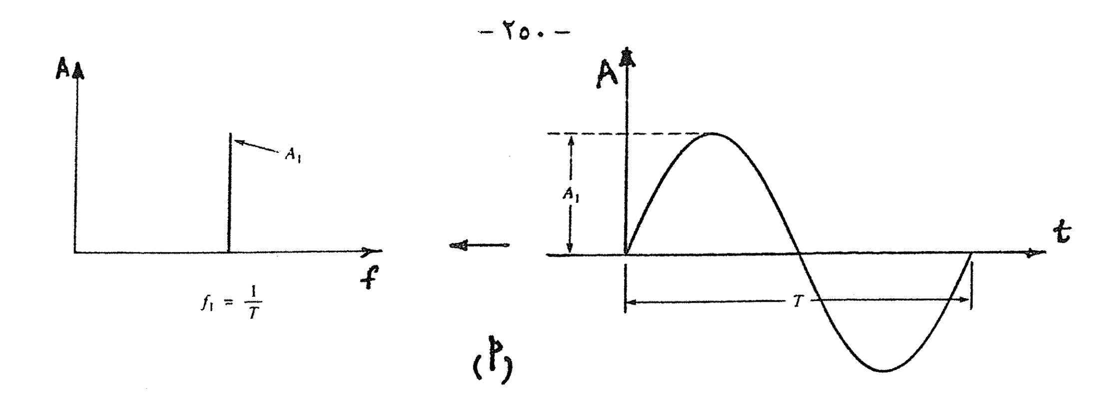
ومن أمثلة أجهزة محللات التوافقيات لقياس توافقيات وجه واحد . محلل توافقيات



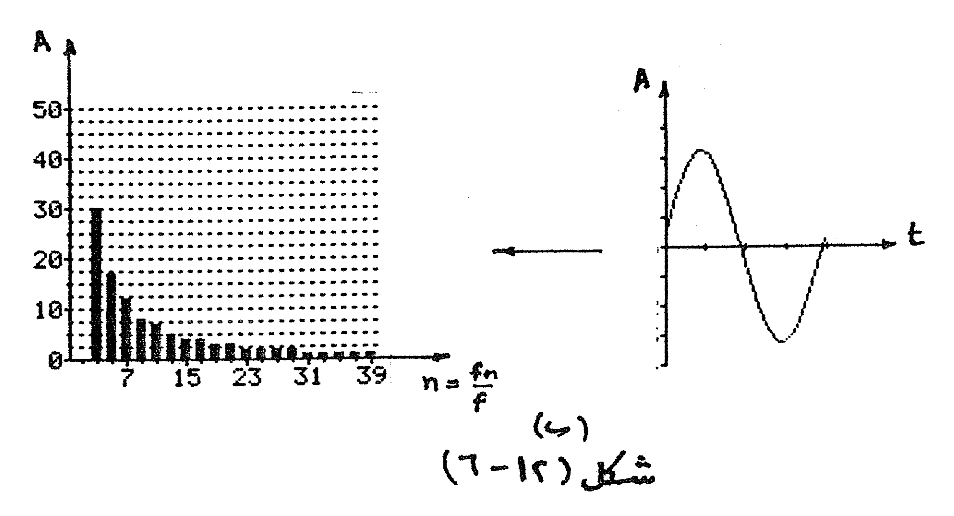


مثال لعينات موجودة فى نافذة الزمن

شكل (١١ - ٦)

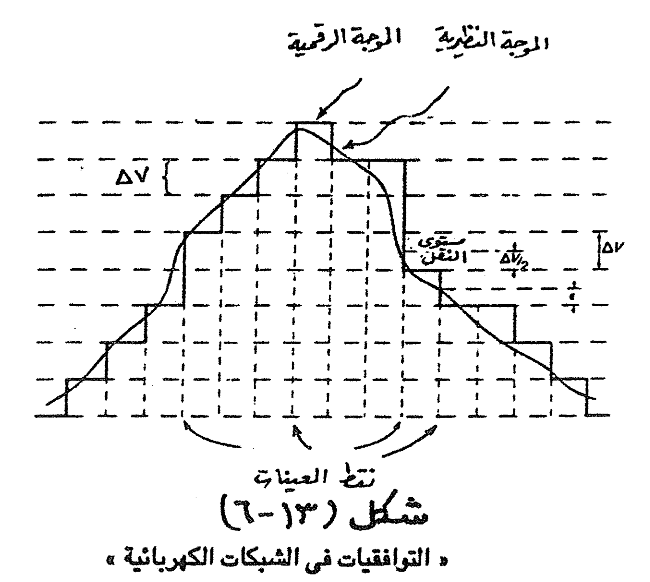


(أ)

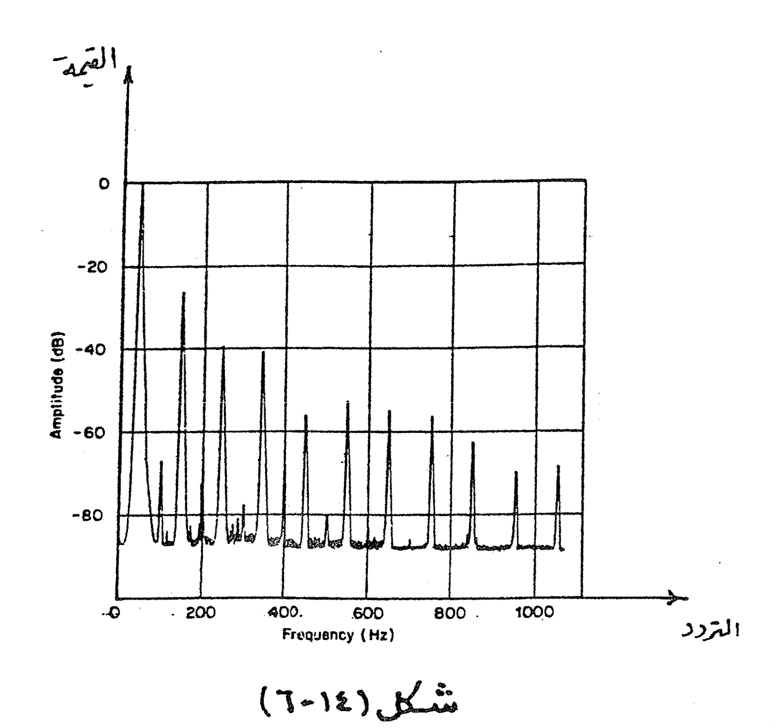


(ب)

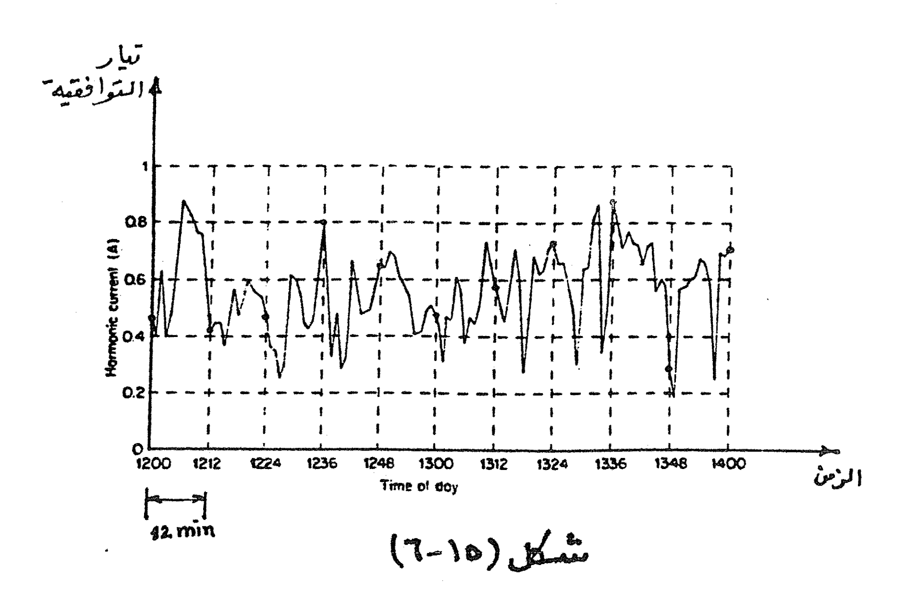
شكل (١٢-٦)



شكل (١٣-٦)



شكل (١٤-٦)



شكل (١٥-٦)

اسبانى الصنع ـ نحصل منه على:

أ - رسم لقيم توافقيات التيار والجهد ممثلة بقضبان *(Bar graphs)* رأسية عند التوافقيات المختلفة ، كما فى شكل (١٨-٦)أ .

ب - شكل موجتى التيار والجهد *(oscilograph wave)* ، كما فى شكل (١٨-٦)ب .

جـ - جدول رقمى ، كما فى الجدول (٣-٦) ، والذى يحتوى على البيانات الآتية لكل من التيار والجهد :

قيمـة جـذر متوسط المربعـات *(rms)* ، المركبـة الاساسيـة ، قيمة التشـوه الكلـى *(THD%)* بالاضافة الى معامل القدرة والقدرة غير الفعالة والتردد .

بينما تسجل عند كل توافقية البيانات الآتية :

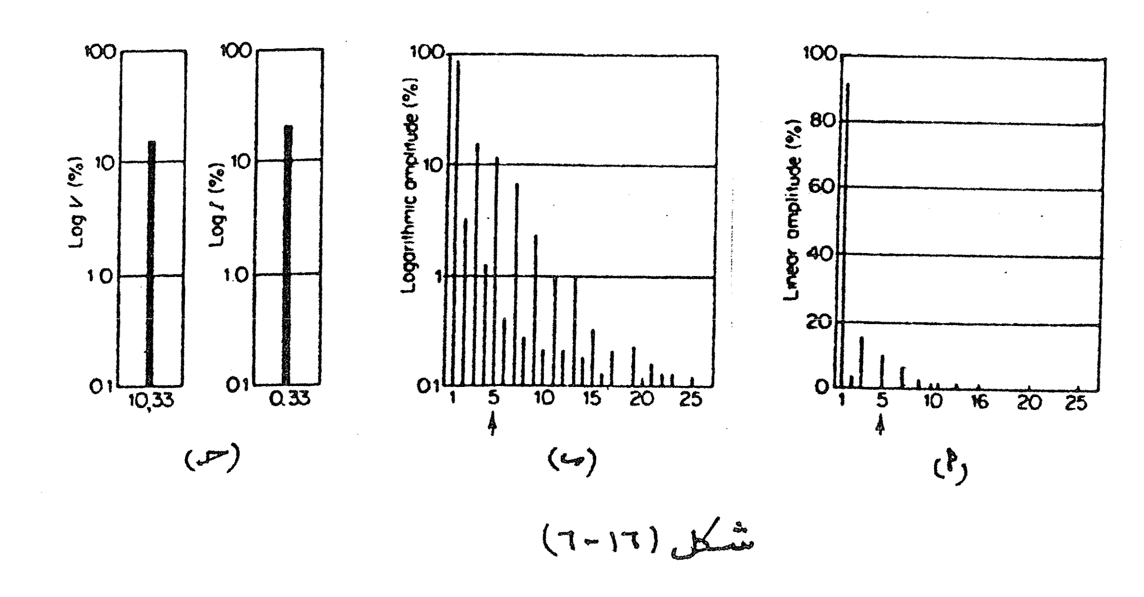
- القيمة المتوسطة *(average value)* كنسبة مئوية للتيار والجهد.
- أقصى قيمة *(maximum value)* كنسبة مئوية للتيار والجهد .

ومن الاهمية التنوية على ان تحليل موجة التيار او الجهد يمكن ان تحتوى بالاضافة الى درجات التوافقيات الثانية ـ الثالثة ـ الرابعة ـ ... (اى الزوجية والفردية) ، على التوافقيات عند انصاف درجات التوافقيات مثل $1/2\ f$ او $3/2\ f$ وتعرف هذه التوافقية بالتوافقية الفرعية *(Subharmonic)* ، اما التموجات الحادثة عند اجزاء من درجات التوافقية (غير $1/2f$, $3/2f$ ....) . تعرف بالاستجابة الزائفة *(Spurious response)* وعادة تعرف التوافقيات الحادثة بين درجات التوافقيات سواء الزوجية او الفردية بالتوافقيات البينية *(interharmonics)* ويوضح شكل (١٩-٦) هذه التعريفات لمثالين مختلفين .

الاختبارات النوعية *(Type Tests)* طبقاً للمواصفات القياسية *IEC 555-2*

- قياس توافقيات تيار المدخل

يوضح شكل (٢٠-٦)طريقة توصيل المعدة المراد قياس مركبات توافقيات تيار المدخل ، حيث توصل المعدة على التوالى مع مقاومة R_M ، والتى تعرف بمقاومة توازى القياس *(Measuring shunt)* ، او مع محول تيار من خلال مصدر تغذية له نفس الجهد المقنن والتردد للمعدة تحت الاختبار ويوصل محلل الموجة *(wave analyzer)* على التوازى مع

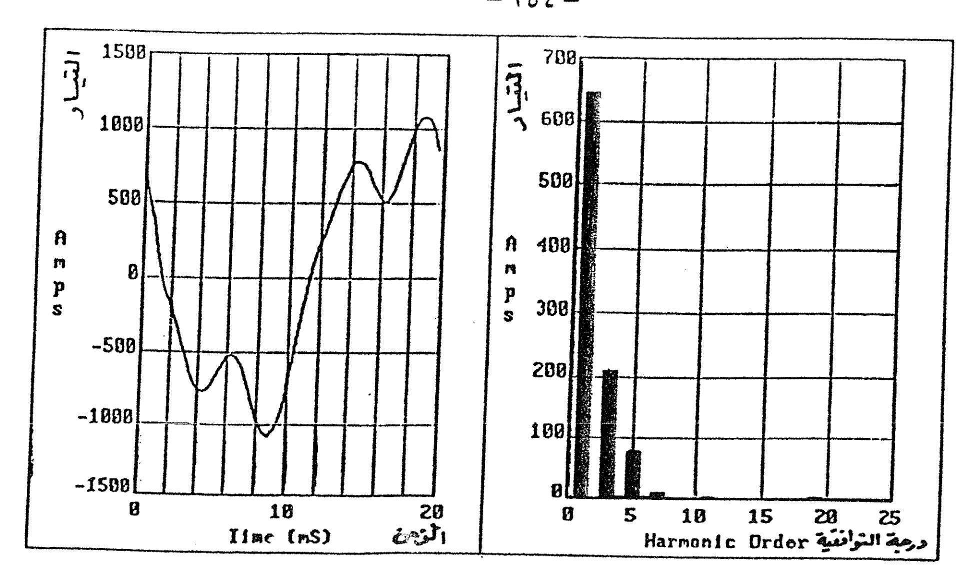


شكل (٦-١٦)

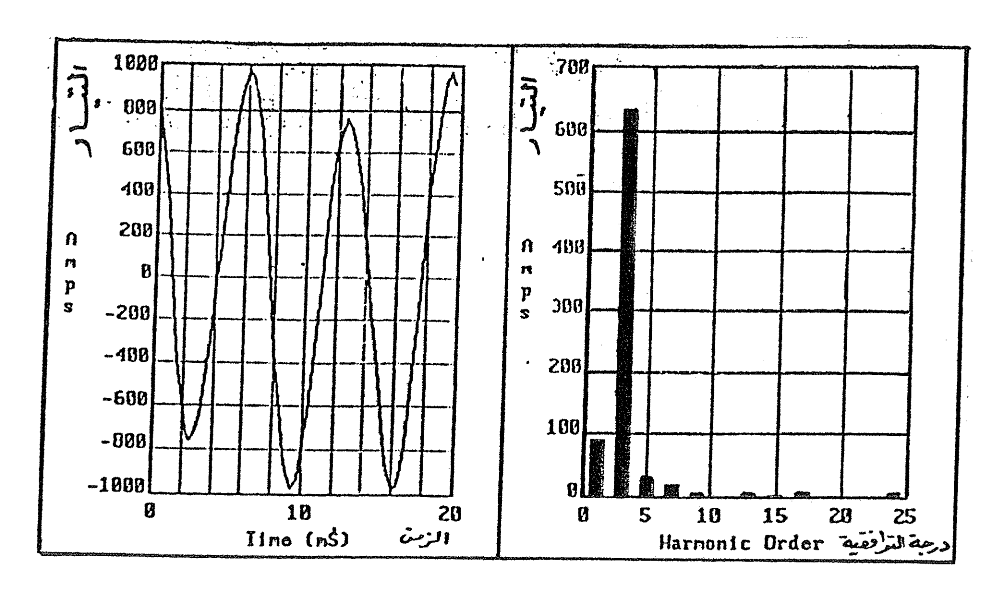
جدول (٦-٢)

ELCONTROL VIP SYS.3 13-07-90 17:18:55
HARMONIC ANALYZER SINGLE PHASE

L1(R)						L2(S)						L3(T)					
V 219	A -259					V 219	A 244.5					V 219	A 35.2				
DV % 0	DA % 53	Hz 50				DV % 0	DA % 59	Hz 50				DV % 0	DA % 15	Hz 50			
n	Volt	%	Amp	%	cosϕ	n	Volt	%	Amp	%	cosϕ	n	Volt	%	Amp	%	cosϕ
01	219	x	228.4	x	0.996	01	219	x	210.5	x	0.992	01	219	x	34.8	x	0.347
02	0	0	112.4	49	-0.163	02	0	0	113.8	54	-0.191	02	0	0	3.4	10	0.989
03	0	0	23.9	10	-0.965	03	0	0	26.3	13	-0.966	03	0	0	2.3	7	0.990
04	0	0	25.9	11	-0.852	04	0	0	27.6	13	-0.857	04	0	0	1.7	5	0.986
05	0	0	20.6	1	-0.758	05	0	0	21.5	10	-0.788	05	0	0	1.4	4	0.983
06	0	0	11.4	0	-0.588	06	0	0	11.9	6	-0.656	06	0	0	1.2	3	0.977
07	0	0	15.9	0	0.132	07	0	0	15.7	7	0.073	07	0	0	1.0	3	0.972
08	0	0	10.4	0	0.788	08	0	0	9.6	5	0.763	08	0	0	0.9	2	0.964
09	0	0	11.2	0	0.934	09	0	0	10.4	5	0.933	09	0	0	0.8	2	0.954
.						.						.					
25	0	0	0	0		25	0	0	0	0		25	0	0	0	0	


التيار
Amps
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
0
10
20
Time (mS)
الزمن
700
600
500
400
300
200
100
0
5
15
25
Harmonic Order
درجة التوافقية

(أ)


التيار
Amps
1000
800
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
-1000
10
20
Time (mS)
الزمن
700
600
500
400
300
200
100
5
15
25
Harmonic Order
درجة التوافقية

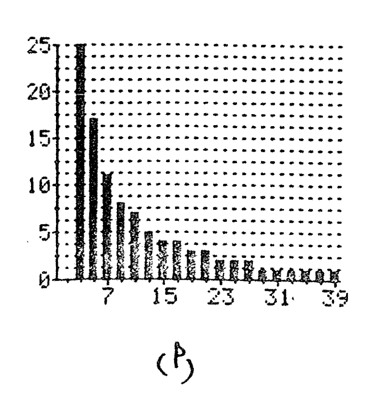
(ب)

شكل (١٧-٦)

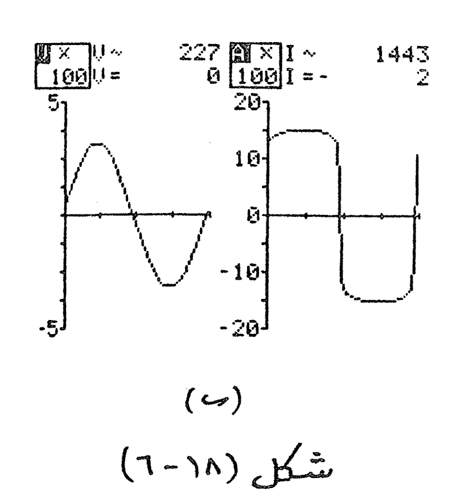
جدول (٦-٣)

CIRCUTOR HARMONICS ANALYZER
DATE: 19/11/90 . TIME: 10:09 REFER: AC
FUNDAMENTAL PARAMETERS :
SAMPL/CYCLE= 1 F = AUTO PER.= 00:01
F(T) = 50.0 Hz F(M) = 50.0 Hz
V(RMS)= 229 V I(RMS)= 712 A
V1 = 229 V I1 = 665 A
THD(V)= 1.1 % THD(I)= 36.4 %
W= 152 k var= -57739
PF= .935 PHASE= SINGLE

HAR	AVG. VALUES		MAX. VALUES		
n	Vn %	In %	Vn %	In %	I1(A)
DC	0.24	0.63	---	---	---
2	0.27	0.35	0.28	0.36	665
3	0.55	29.85	0.54	29.86	665
4	0.16	0.27	0.15	0.27	665
5	0.56	16.90	0.61	16.91	665
6	0.03	0.20	0.01	0.20	665
7	0.40	11.49	0.38	11.49	665
8	0.07	0.18	0.07	0.19	665
9	0.10	8.49	0.11	8.50	665
10	0.02	0.16	0.02	0.16	665
11	0.22	6.62	0.20	6.63	665
12	0.04	0.14	0.05	0.15	665
13	0.08	5.34	0.07	5.36	665
14	0.02	0.12	0.01	0.12	665
15	0.09	4.40	0.09	4.43	665
16	0.02	0.12	0.03	0.12	665
17	0.04	3.70	0.02	3.70	665
18	0.02	0.10	0.02	0.11	665
19	0.01	3.12	0.01	3.13	665
20	0.01	0.13	0.01	0.17	665
21	0.02	2.71	0.02	2.73	665
22	0.02	0.08	0.00	0.09	665
23	0.07	2.33	0.07	2.35	665
24	0.03	0.07	0.03	0.07	665
25	0.04	2.01	0.04	2.02	665
26	0.01	0.07	0.02	0.08	665
27	0.02	1.75	0.02	1.77	665
28	0.01	0.05	0.01	0.05	665
29	0.00	1.52	0.00	1.53	665
30	0.01	0.05	0.01	0.06	665
31	0.04	1.34	0.03	1.34	665
32	0.01	0.04	0.01	0.04	665
33	0.03	1.17	0.03	1.18	665
34	0.01	0.03	0.01	0.03	665
35	0.01	1.03	0.01	1.03	665
36	0.00	0.03	0.00	0.03	665
37	0.03	0.90	0.03	0.91	665
38	0.00	0.03	0.00	0.03	665
39	0.02	0.79	0.02	0.80	665
40	0.00	0.03	0.00	0.04	665

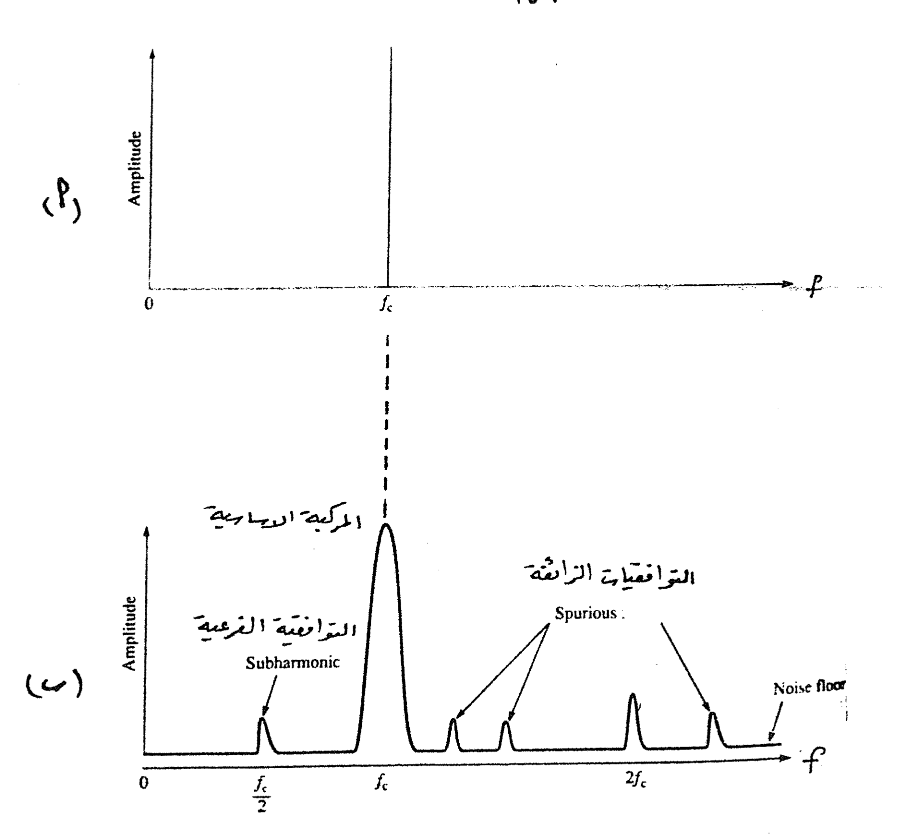


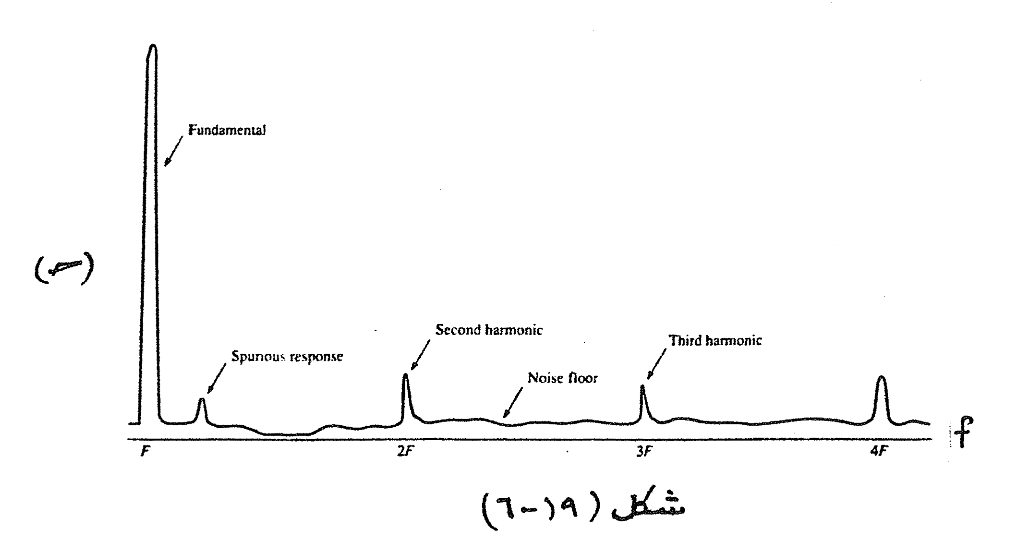
(أ)



(ب)

شكل (٦-١٨)





شكل (٩-٦)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

المقاومة (R_M)

فاذا كان تغيير تيار التوافقيات أكثر تناسباً مع جهد المصدر ، فإن الاختبارات تتم عند جهود مصدر تساوي ٠,٩٤ & ١,٠٦ مرة من التيار المقنن للمعدات ذات جهد اكبر من الجهد المقنن ، واذا اختبرت عند الجهد المقنن فانها تنتج توافقيات بقيم اعلى من القيم المحددة .

اما المعدات ذات الجهد المقنن المحدد فان القياسات تتم عند أقصى حد للمصدر

تستخدم التوصيلات فى شكل (٢٠-٥) أ لقياس معدة احادية الوجه.

وتستخدم التوصيلات بشكل (٢٠-٥) ب لقياس معدة ثلاثية الاوجه .

- يجب مراعاة الآتى لمصدر التغذية :

أ - عند اخذ القياسات ، يجب حفظ الجهد فى حدود $\pm 2\%$ من القيمة المختارة والتردد فى حدود $\pm 0.5\%$ من القيمة الاسمية .

ب - تكون المعاوقة الداخلية لمصدر التغذية ، بالاضافة الى المعدات المقاسة ، عند كل تردد ، صغيرة بما يكفى حتى لايتأثر تيار التوافقيات المقاس وتختلف عن القيم المثالية (والتى تكون صفر) 5% من الحدود المسموحة .

جـ - يجب ان تكون نسبة التوافقيات فى جهد المصدر ، عند حالة اللاحمل ، صغيرة جداً وذلك لتجنب التأثير على القياسات ، وفيما يلى نبين القيم الاسترشادية لهذه النسب :

0.9% للتوافقية الثالثة .

0.4% للتوافقية الخامسة .

0.3% للتوافقية السابعة .

0.2% للتوافقية التاسعة .

0.2% للتوافقيات الزوجية من الثانية وحتى العاشرة .

0.0% للتوافقيات الفردية من الحادية عشر الى الاربعين .

- لاتتعدى قيمة المقاومة R_M القيمة $0.1\ ohm$ (ولايتعدى ثابت الزمن $s\ 10^{-5}$) ، اى

لاتوجد محاثة .

- عند استخدام محولات تيار يجب التأكد أن الخطأ الحادث من مركبة $d.c$ التيار المقاس لايتعدى 5% من الحدود المسموحة .

- يجب مراعاة الآتى بجهاز محلل التوافقيات :

أ - الا يتعدى خطأ القياس فى مركبات تيارات التوافقيات $(2 \leq n \leq 40)$ 5% من الحدود المسموحة .

ب - يكون الاختيار بين الاجهزة لكل قيمة لتردد التوافقية f_n تبعاً للآتى :

١ - اقل توهين (attenuation) لأية ترددات محقونة اقل من او يساوى $(f_n - f_1)$ أو أكبر من أو يساوى $(f_n + f_1)$ تبعاً للجدول الآتى :

اقل توهين	
$30\ dB$	If $3 f_1 \leq f_n \leq 12 f_1$
$20\ dB$	If $12 f_1 < f_n \leq 20 f_1$
$15\ dB$	If $20 f_1 < f_n \leq 40 f_1$

حيث :

f_n تردد التوافقية n (علماً بان العلاقة بين f_n, f_1 هى $f_n = nf_1$)

f_1 تردد المصدر

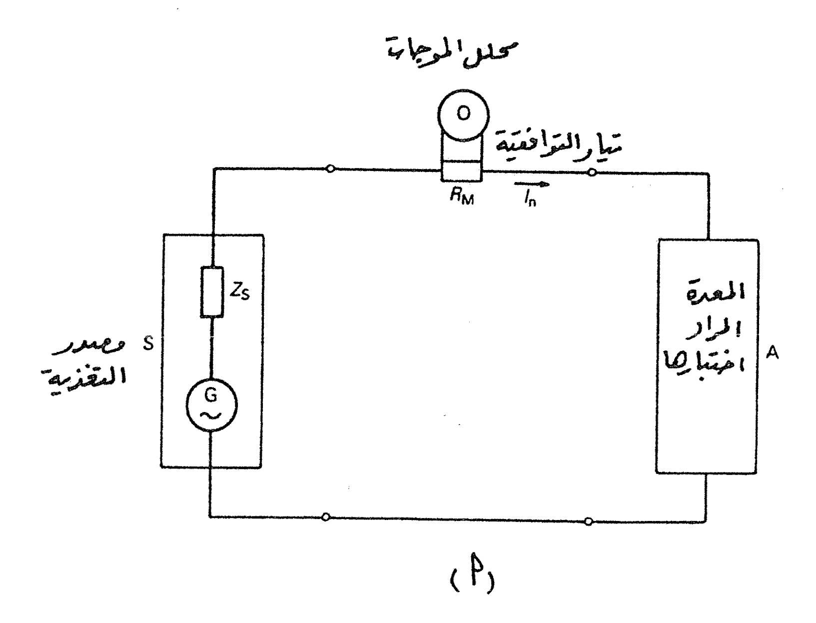
٢ - يجب ان يكون التوهين اكبر من او يساوى $34dB$ لاى تـردد محقـون اقـل مـن $0.25 f_n$ عندما تكون f_n اكبر من $12 f_1$.

٣ - يكـــون التوهين للتردد $2f_1$ على الاقل $40dB$ بينمـا للتردد $3f_1$ لايقـل عـن $30dB$

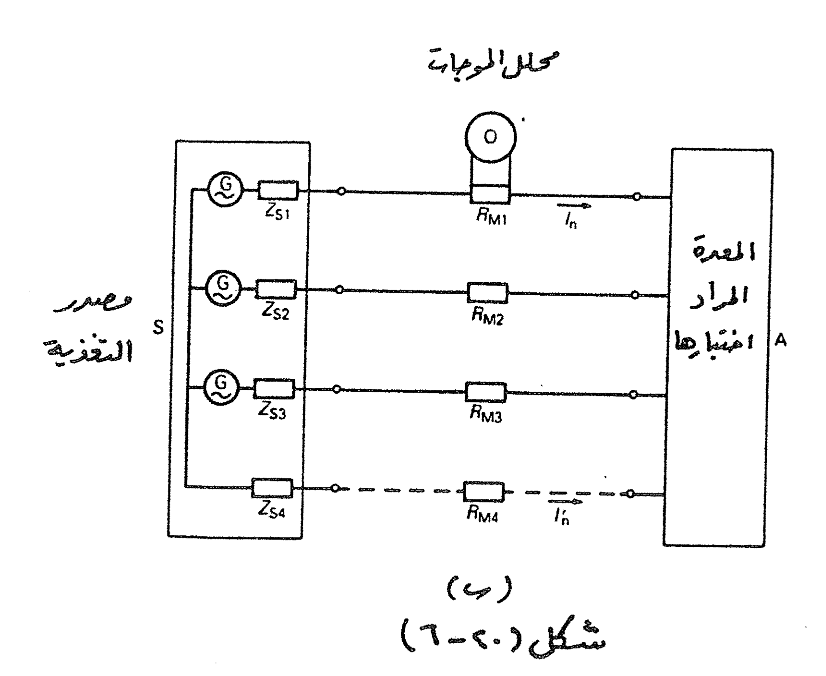
جـ - اذا كانت مركبات توافقيات تيار المدخل تتغير خلال الاختبار ، فيجب مراعاة الاتي :

١ - عند تسليط جهد جيبى له تردد f_n على الجهاز لمدة ثانية واحدة فان اقصى دلالة له يجب ان تقع بين % 50 & %40 من النتيجة التى نحصل عليها فى حالة تسليط نفس الجهد بصفة مستمرة .

٢ - عند التسليط الفجائى لجهد جيبى له تردد f_n على الجهاز ، فان اقصى دلالة له يجب الا تتعدى الدلالة الحادثة من حالة الاستقرار بزيادة % 5 .



(أ)



(ب)

شكل (٢٠-٦)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

الباب السابع
المرشحات
Filters

ان طبيعة تكوين الشبكات الكهربائية احتوائها على معدات مختلفة ومتعددة ومتصلة معاً مثل المولدات والمحولات وخطوط وكابلات نقل القدرة بالاضافة الى المكثفات والمحركات والمفاعلات ... وعند عمل دراسة او تحليل لجزء من الشبكة فان معاوقة هذا الجزء تعتمد على : التردد وطبيعة المعدات وكذلك طريقة اتصال معدات هذا الجزء معاً فمثلاً اذا وصلنا مكثف على التوالى مع معاوقة حاثية (كتمثيل لشبكة كهربائية) ، فانه عند حدوث تردد معين تصبح محصلة معاوقتهما صغيرة جداً وتحدث بالقرب من تردد الرنين وتعرف هذه الظاهرة برنين التوالى *(Series resonance)* بينما اذا وصلت محاثة وسعوية على التوازى فنجد انه عند حدوث تردد معين تصبح محصلة معاوقتهما كبيرة جداً ، ويحدث هذا بالقرب من تردد الرنين وتعرف هذه الظاهرة برنين التوازى *(Parallel resonance)* .

ويمكن حدوث رنين التوالى ورنين التوازى لنفس الشبكة ولكن عند ترددات مختلفة .

حينما تحتوى شبكة كهربائية معينة على تردد رنين وكان من مكوناتها احمال تصدر توافقيات التيار او الجهد عندئذ يحدث تكبير للتيارات او الجهود والتى تتسبب فى تشوه الموجات وحدوث زيادة احمال وانهيار بعض مكونات الشبكة . وللتغلب على مشاكل الرنين نحاول أبعاد تردد الرنين عن ترددات التوافقيات الموجودة بالشبكة .

ويوضح شكل (١-٧) أ تمثيل لهذه الحالة وهى عبارة عن شبكة كهربائية ممانعتها الحاثية (X_s) متصل معها مكثف ممانعة السعوية $(-X_c)$ واحمال تصدر التوافقيات (i_n) نقوم بتوزيع التيار i_n فى الشبكة والمكثف تبعاً للمعادلة :

$$i_{ns} = i_n \frac{(-X_{cn})}{X_{sn} - X_{cn}}$$

$$i_{nc} = i_n \frac{X_{sn}}{X_{sn} - X_{cn}}$$

حيث تتناسب X_{sn} طردياً مع التردد بينما X_{cn} تتناسب عكسياً مع التردد .

وتعرف النسبة $\frac{i_{ns}}{i_n}$ بتكبير التيار *(Current amplification)* .

وعندما تتساوى المانعتين X_{cn} , X_{sn} ، وعند تردد معين ، فان قيمة تكبير التيار تساوى ما لانهاية .

ويفضل اضافة مقاومة كبح *(resistive damping)* للحد من تكبير التيار عند الرنين، وتكون القيم النموذجية لاقصى قيمة للنسبة $\frac{i_{ns}}{i_n}$، عند رنين توافقيات الدرجات المنخفضة ، هى من ٢ الى ١٠ اعتماداً على الشبكة والحمل . ويوضح شكل (١-٧) ب العلاقة بين تكبير التيار $\frac{i_{ns}}{i_n}$ والتردد f للشبكة الموضحة فى شكل (١-٧) أ .

وفى حالة استخدام المكثفات ذات القدرات الكبيرة فان الرنين يحدث عند الترددات المنخفضة ، وكمثال ، عند تردد التوافقية الخامسة او السابعة ، واذا لم نتخلص من حالات الرنين تحدث مشاكل بالشبكة الكهربائية .

وعند تركيب مكثفات على شبكة كهربائية لتحسين معامل القدرة فانه يلزم اولاً التأكد من عدم وجود مصادر توافقيات تيار او جهد فى هذه الشبكة ، ثم بعد ذلك يتم حساب تردد الرنين فى وجود المكثفات فاذا كان اكبر من الدرجة ٢٥ فلا توجد اية مشاكل من تركيب المكثفات وتعتبر موجة هذا المصدر نقية .

اذا ادى تركيب المكثف الى حالة رنين فيمكن علاج ذلك بتركيب مفاعل *(reactor)* على التوالى مع المكثف وتعرف هذه التوصيلة بمرشح فض التوليف *(Detuned Filter)* أو مرشح مضاد التوافقية *(Anti - harmonic Filter)*.

مرشح فض التوليف *(Detuned Filter)*

يتم اضافة مفاعل على التوالى مع مكثف كل مرحلة لمصفوفة مكثفات تحسين معامل القدرة ويكون هذا المفاعل صغيراً وتأثيره هامشى علي القدرة غير الفعالة الكلية عند التردد الاساسى . وعند تردد معين تتساوى ممانعة المفاعل مع ممانعة المكثف ، ويعرف هذا التردد بتردد التوليف *(Tuning Frequency)* ويرمز له f_t وتكون القيمة الكلية للمعاوقة حاثية موجبة للترددات الاعلى من f_t . وبأختيار قيمة f_t للمرشح اقل قليلاً من اقل تردد توافقية متولدة فى هذه الشبكة فان معاوقة التعويض ومعاوقة الشبكة تكون

حاثية *(inductive)* وبالتالى استحالة الوصول لحالة لرنين ، وعند الترددات الاقل من f_t تكون معاوقة التعويض سالبة وهنا تنشأ نقطة الرنين ولكنها لن تكون فعالة لعدم وجود توافقيات مولدة عند هذه الترددات .

ويوضح شكل (٢-٧) العلاقة بين نسبة تكبير التيار والتردد *(f)* .

فاذا كانت الشبكة الكهربائية تحتوى على تيار التوافقية الخامسة مثلاً ، فانه يتم اختيار f_t مساوية تقريباً لتردد التوافقية الخامسة $(5f_1)$ ويعرف المرشح فى هذه الحالة مرشح التوافقية الخامسة *(5th harmonic filter)* ، كما فى شكل (٢-٧) وعند الاحتياج لاكثر من مرشح ، فيتم تركيب مفاعل علي التوالى مع مكثف كل مرحلة بحيث تولف كل مرحلة (مكثف ومفاعل) عند توافقية مختلفة ، فمثلاً يوضح شكل (٣-٧) أ مرشحات للتوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر بينما يوضح شكل (٣-٧) ب العلاقة بين $\frac{i_{ns}}{i_n}$ مع التردد f لهذه الدائرة

عموماً تعتمد كفاءة المرشح على :

- الحجم *(Size)* .
- دقة التوليف *(Tuning accuracy)* .
- دقة تردد الشبكة *(Frequency accuracy)* .

ويكون الاختلاف بين تردد التوليف وتردد التوافقية حوالى من ٥ - ٦ ٪ من قيمة التوليف المقنن ، بينما يكون من ٢ -٣ ٪ فى حالة وجود نقط تقسيم على المفاعلات .

عموماً عند وجود التوافقيات فانه يمر بالمرشح مجموع التيارين i_{nc} ، i_f اى ان

$$i_c = i_{nc} + i_c$$

حيث :

i_{nc} = الجزء من تيار التوافقية n المار بالمرشح .

i_f = تيار المركبة الاساسية للنظام المار بالمرشح .

بينما يكون الجهد بين طرفى المكثف عند التردد الاساسى

$$V_c = V_f \quad \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

والجهد بين طرفى المفاعل عند التردد الاساسى

$$V_L = V_f \frac{1}{n^2 - 1}$$

$$V_c = V_f + V_L$$

حيث V_f جهد النظام عند التردد الاساسى

ويبين شكل (٤-٧) قيم الجهد V_L , V_c عند التردد الاساسى وعند تردد الرنين .

مرشحات التوافقيات *Harmonic Filters*

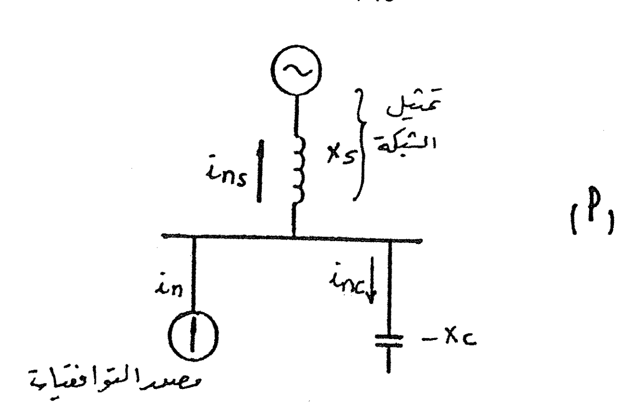
أن الغرض الرئيسى من تركيب مرشحات التوافقيات هو تقليل تيار او جهد تردد ثابت معين (او تقليل تيار او جهد توافقية ثابتة معينة) او تيارات وجهود ترددات معينة .

وعند التفكير فى تركيب مرشحات يجب اولاً قياس تيارات وجهود التوافقيات فى الجزء من الشبكة المراد تركيب المرشحات بها . ثم تسجيل مواضع المكثفات المركبة لتحسين معامل القدرة او تعويض القدرة غير الفعالة على هذه الشبكة (ان وجدت مكثفات) ، فاذا كانت تيارات التوافقيات اكبر من الحدود المسموحة بالمواصفات القياسية العالمية فنبدأ فى تغيير مواضع تركيب المكثفات على الشبكة وأخذ قياسات مرة أخرى كما يمكن التوصية بفصل المكثفات فى الفترات التى يحدث بها زيادة فى تيارات التوافقيات . وفى بعض الشبكات الكبيرة يمكن تغيير موضع تأريض نقطة التعادل بالشبكة بعيداً عن الاماكن القريبة من تركيب المكثفات حتى يمنع مرور التوافقيات الثلاثية الفردية (الثالثة - التاسعة - الخامسة عشر ...) فى مسار التعادل .. واذا لم تنجح اى من هذه الاقتراحات فنبدأ فى التفكير فى تركيب مرشحات لتقليل تيار او جهود التوافقيات عند درجات التوافقيات الموجودة فى الشبكة .

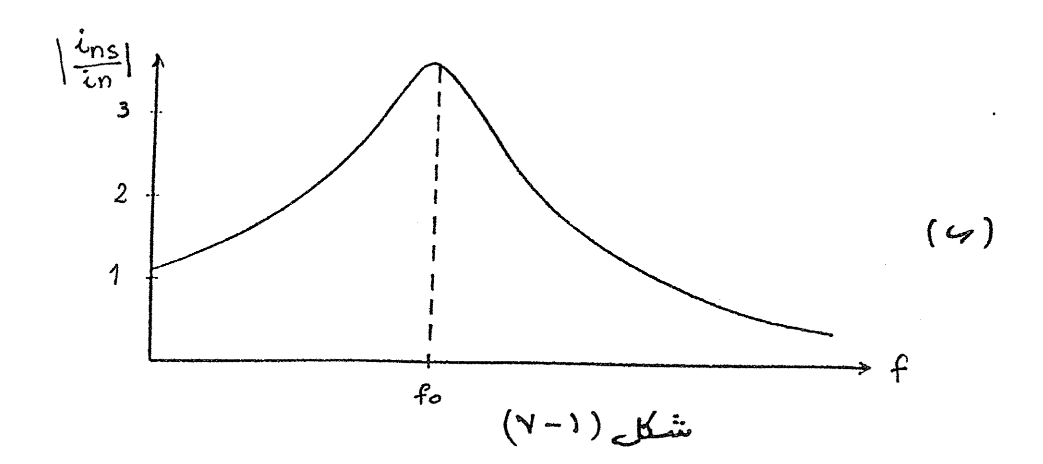
ويتكون المرشح من مفاعلات *(reactors)* ، ومكثفات *(Capacitors)* متصلة على التوالى او التوازى او على التوالى والتوازى معاً .

ويسمى مرشح التوازى *(Shunt filter)* بانه مرشح توازى التوليف *(Tuned shunt filter)* حيث تتساوى فيه قيمتى ممانعتى المفاعل والمكثف $(X_c = X_L)$

ان الخصائص الاساسية لمرشح توازى التوليف عبارة عن تردد التوليف *(Tuned frequency)* ومعاوقة التوليف *(Tuned impedance)* وثابت المرشح *(Filter constant)* اوعامل الجودة *(quality factor)* والتى يرمز لها بالرمز Q . ويعرف ثابت المرشح بانه

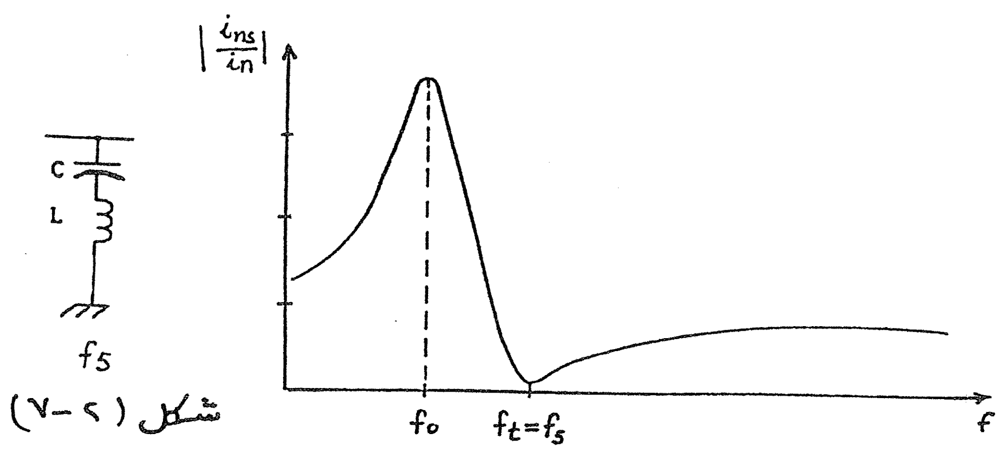


تمثيل الشبكة
X_s
i_{ns}
i_n
i_{nc}
$-X_c$
مصدر التوافقيات
(أ)



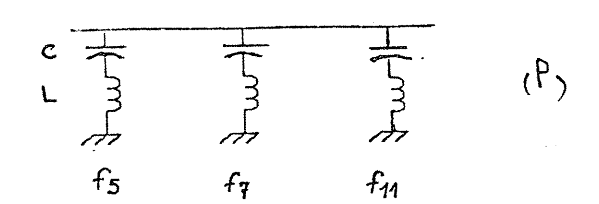
$\left|\frac{i_{ns}}{i_n}\right|$
3
2
1
f_o
f
(ب)

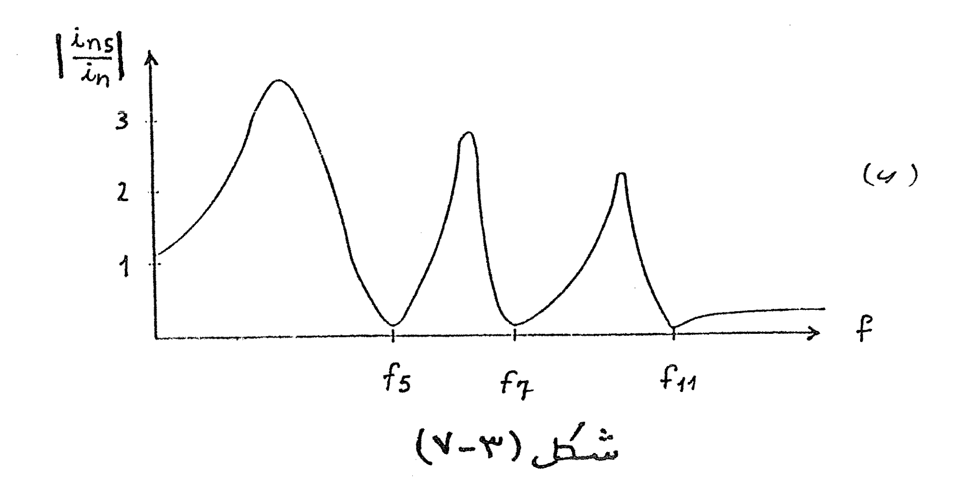
شكل (١-٧)



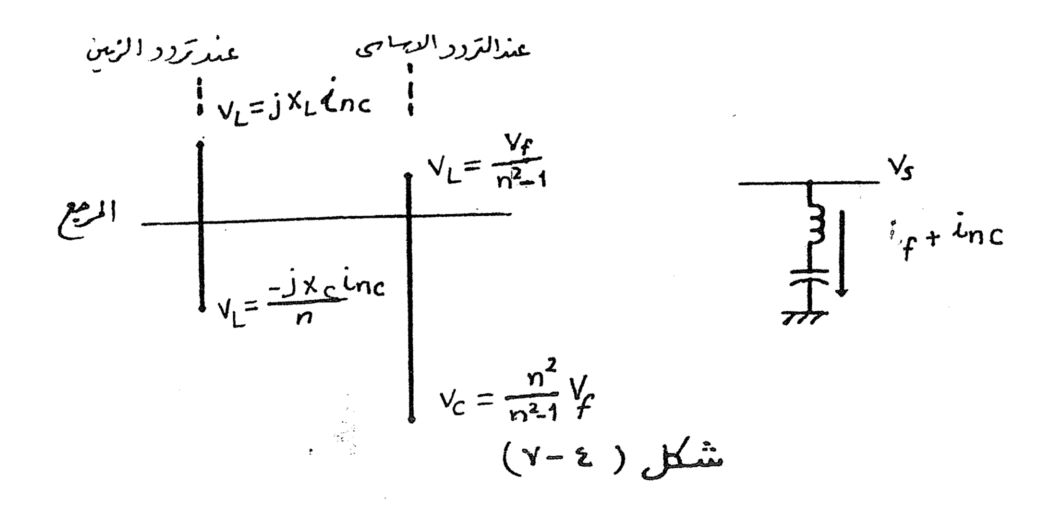
$\left|\frac{i_{ns}}{i_n}\right|$
C
L
f_5
f_o
$f_t = f_5$
f

شكل (٢-٧)


C
L
f5
f7
f11
(أ)


|ins/in|
3
2
1
(ب)
f
f5
f7
f11

شكل (٣-٧)


عند تردد الرنين
عند التردد الأساسي
$V_L = jX_L i_{nc}$
$V_L = \frac{V_f}{n^2-1}$
المرجع
$V_L = \frac{-jX_C i_{nc}}{n}$
$V_C = \frac{n^2}{n^2-1} V_f$
Vs
$i_f + i_{nc}$

شكل (٤-٧)

النسبة بين ممانعة المفاعل (أو المكثف) عند تردد التوافقية والمقاومة عند تردد التوافقية (اى عند تردد الرنين) اى ان :

$$Q = X_0 / R$$

حيث :

X_0 = ممانعة المفاعل (او المكثف) عند الرنين .

R = المقاومة عند تردد الرنين

وتعطى الكمية Q دلالة لحدة التوليف *(Sharpness of tuning)* ويوجد نوعين من المرشحات هما :

أ - المرشح ذو الكمية Q العالية *high Q - Filter*

وتتراوح Q بين ٣٠ - ٦٠ ويوضح شكل (٥-٧) دائرة مرشح توازى التوليف وخاصية العلاقة بين التردد والمعاوقة Z ، بينما يوضح شكل (٦-٧) دائرة مرشح مصيدة الموجه *(wave trap filter)* ومنحنى العلاقة بين f , Z .

ب - مرشح ذو الكمية Q المنخفضة *Low Q - filter*

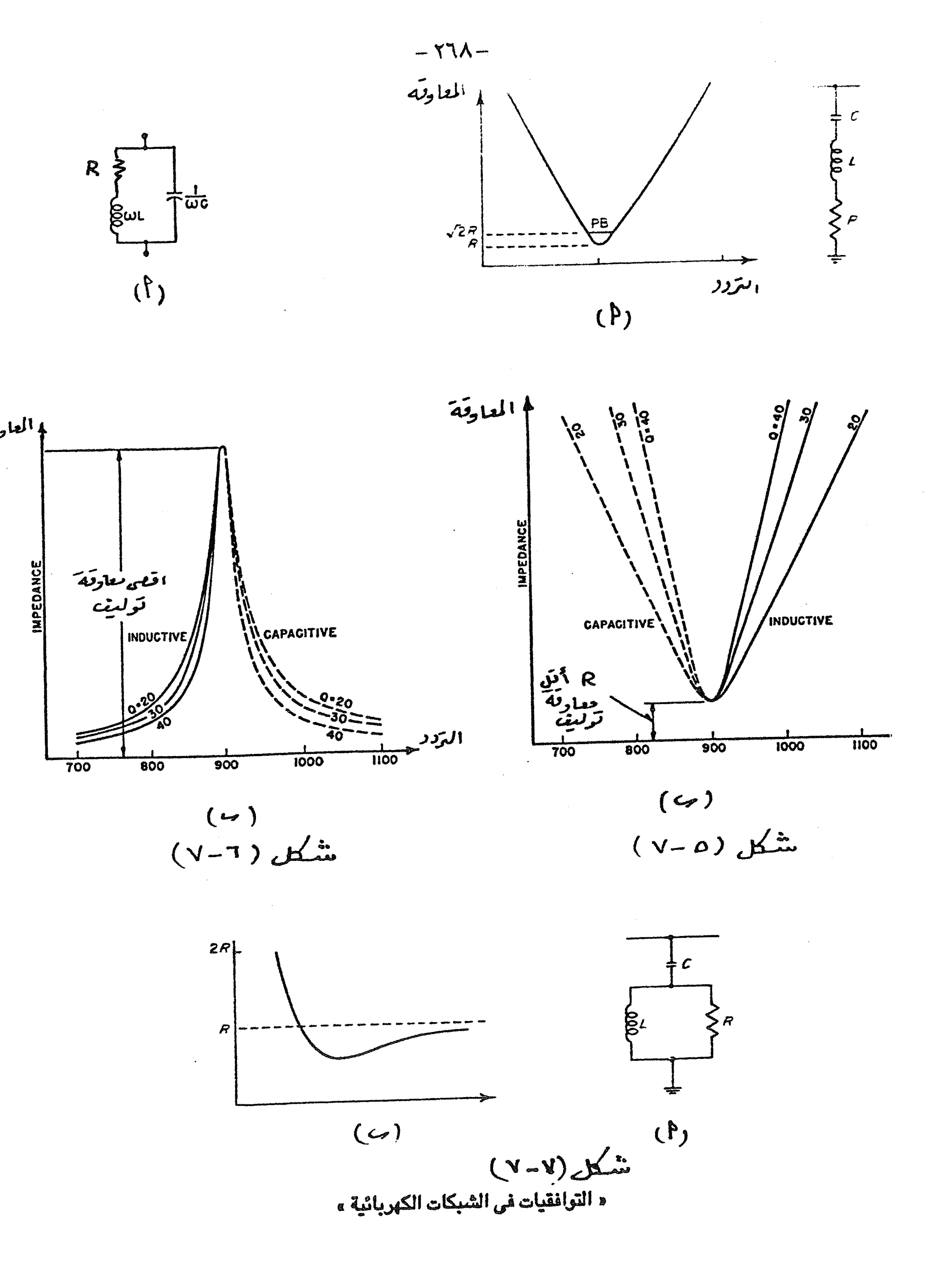
وتتراوح Q بين ٥ ، ٠ - ٥ حيث يكون للدائرة معاوقة منخفضة القيمة لحدود تردد معين، كما هو موضح فى شكل (٧-٧) حيث يوضح دائرة مرشح توازى اخماد من الدرجة الثانية *(Second order damped shunt filter)* . وفى شكل (٥-٧) أ يعرف نطاق مرور الترددات *(pass band)* [والذى يرمز له بالرموز PB] للمرشح بانه حدود التردد التى عندها تتساوى ممانعة المرشح بمقاومته ، بمعنى آخر ان زاوية المعاوقة *(impedance angle)* تساوى ٤٥° ويكون مقياس المعاوقة *(impedance module)* يساوى $\sqrt{2} R$.

ويمكن كتابة العلاقة بين عامل الجودة Q وبين نطاق المرور PB كالآتى :

$$Q = \frac{\omega_n}{PB}$$

حيث ω_n هو التردد الزاوى لمرشح التوليف *(Tuned angular frequency)* بوحدات زاوية نصف قطرية / ثانية *(radians / second)* .

وتكون حدة الرنين Q لمرشحات الاخماد ذات الامرار العالى عكس حدة الرنين



« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

لمرشحات الرنين اى ان :

$$Q = \frac{R}{X}$$

ويمثل عامل فض توليف المرشح *(filter detuning)* بالرمز δ ويطلق عليه ايضاً عامل انحراف التردد *(Frequency deviation factor)* والذى نحصل عليه من العلاقة

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}$$

ويكون منسوباً لتردد التوليف الاسمى *(nominal tuned frequency)* كما يشير هذا العامل الى تأثيرات مختلفة هى :

- التغيير فى التردد الاساسى (تردد المصدر)
- التغير فى سعوية ومحاثة المرشح نتيجة التقادم واختلاف درجات الحرارة .
- فصل التوليف الاولى *(initial off tuning)* نتيجة سماحية الصناعة والحجم المحدد لمراحل التوليف .

هذا ويسبب التغيير الحادث فى C,L بنسبة ٢٪ مثلاً نفس فض التوليف الناتج من تغيير تردد المصدر بقيمة ١٪ ، ولذلك يعبر عن δ من العلاقة :

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} \left\{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right)\right\}$$

نلاحظ فى الشكل (٨-٧) بعض انواع المرشحات

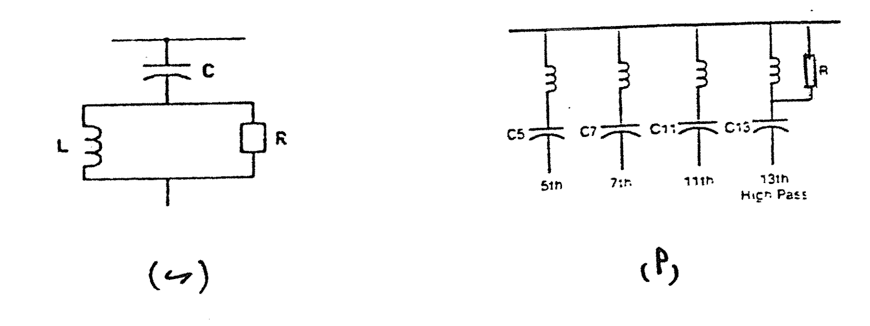
فمثلاً يوضح شكل (٨-٧)أ مصفوفة من مرشحات الرنين للتخلص من التوافقيات الخامسة ، والسابعة ، والحادية عشر ، والثالثة عشر ، وتعرف هذه الدائرة بالمرشح المؤلف *(Composite filter)* .

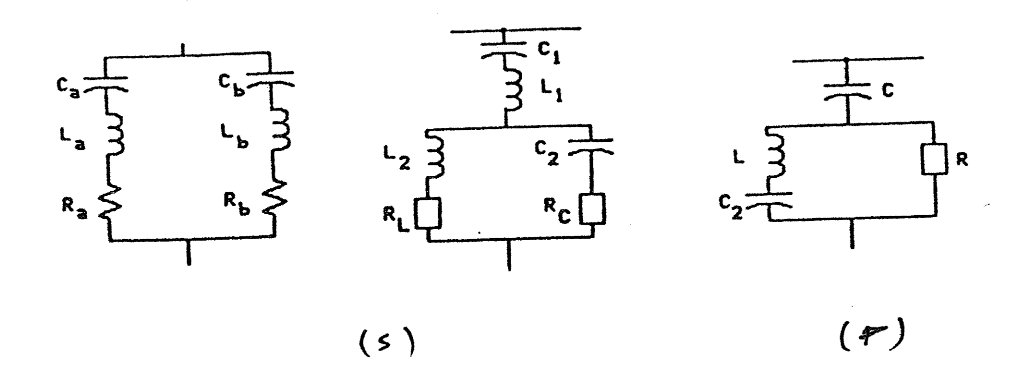
ويوضح شكل (٨-٧) ب مرشح امرار الترددات العالية *High pass filter*

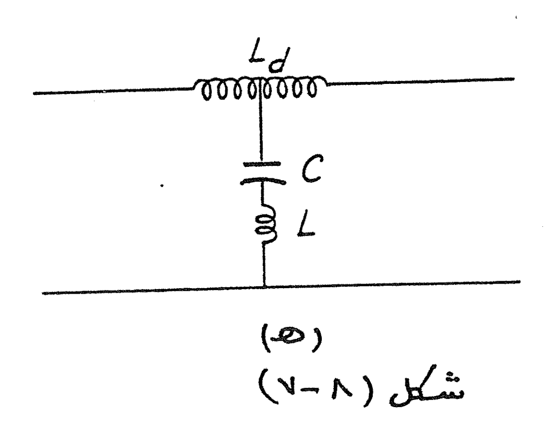
بينما يوضح شكل (٨-٧) جـ المرشح المعدل لامرار الترددات العالية *Modified high pass filter*

وفى شكل (٨-٧) ء مثالين لمرشح امرار نطاقى مزدوج *Double band pass filter*

وفى شكل (٨-٧) هـ مثال لمرشح امرار الترددات المنخفضة *Low - pass filter*


C
L
R
(ب)
C5
C7
C11
C13
R
5th
7th
11th
13th
High Pass
(أ)


Ca
Cb
La
Lb
Ra
Rb
C1
L1
L2
C2
RL
RC
C
L
C2
R
(د)
(ج)


Ld
C
L

(هـ)

شكل (٨ - ٧)

ويكون المكثف C كبير بقدر يكفى لامتصاص التوافقيات ويكون المانع L ذى ثمن معقول ويستخدم هذا المرشح لاخماد جميع الترددات السمعية ، ومركب هذا النوع فى روسيا بالقيم التالية (للجهد ٨٠٠ ك.ف) :

$L=1 \text{ to } 1.5\ H$

$C = 0.5\ \mu F$

كذلك يوضح شكل (٩-٧) أمثلة لمرشحات مركبة على الثلاثة أوجه

فى شكل (٩-٧) أ استخدم مرشح مصيدة *(wave trap filter)* موصلة بنقطة تعادل آلة متزامنة *(Synchronous machine)* للتخلص من تيار التوافقيات الثلاثية الفردية *(triple)* المارة بمسار التعادل لتوصيلة نجمة *(Star)*

بينما يوضح شكل (٩-٧) ب مرشح امرار ترددات منخفضة *(Low pass filter)* يستخدم للتخلص من جميع التوافقيات اعلى من التوافقية الرابعة .

وفى شكل (٩-٧) جـ مرشح تيار متردد غير مولف *(Non - tuned a.c filter)* يستخدم مع موحدات القدرة الصغيرة حيث يتم توصيل المانعة L_S على التوالى مع المصدر بينما توصل المكثفات على التوازى

ويوضح شكل (٩-٧) ء مرشح توليف التوازى للتخلص من التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر الناتجة من مبدل ٦ نبضات .

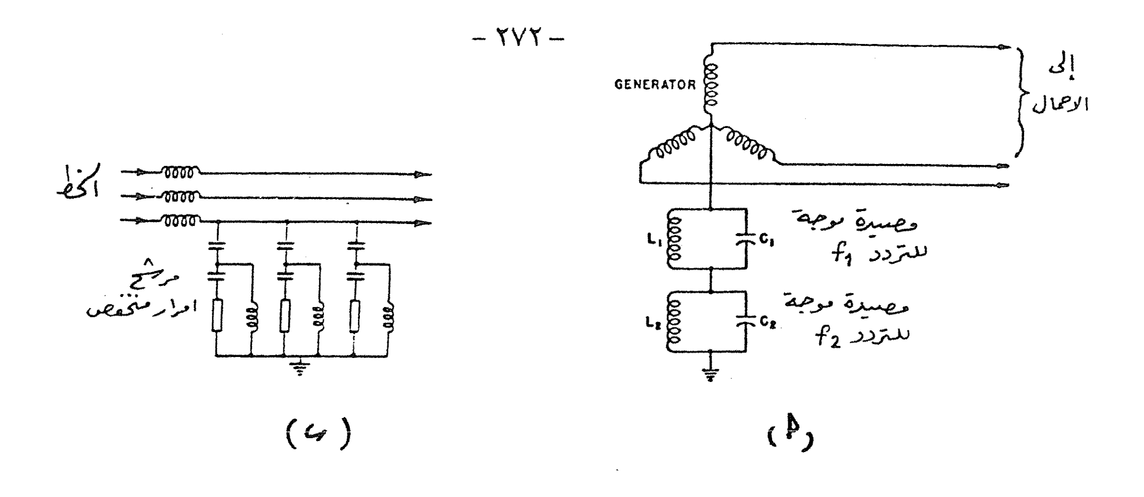
معيار تصميم المرشح

يعرف حجم المرشح *(Size of filter)* بالقدرة غير الفعالة التى يعطيها المرشح عند التردد الاساسى ، والتى هى فى الحقيقة قيمة القدرة غير الفعالة الاساسية للمكثف. ويحدد الحجم الكلى لكل افرع المرشح عن طريق القدرة غير الفعالة المطلوبة لمصدر التوافقيات ، على الشبكة الكهربائية .

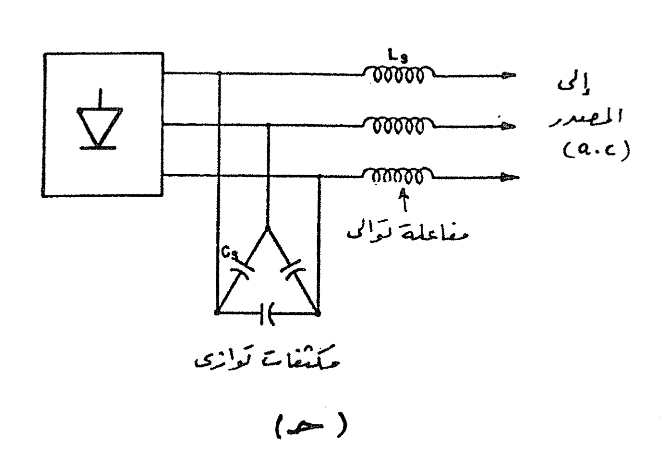
ويصمم المرشح ، من الناحية النظرية لحذف جميع التأثيرات الحادثة من تشوه الموجات ، بما فيها التداخل مع خطوط الاتصالات ، والتى يصعب تحقيقها .

تتبع الخطوات التالية لتصميم المرشح :

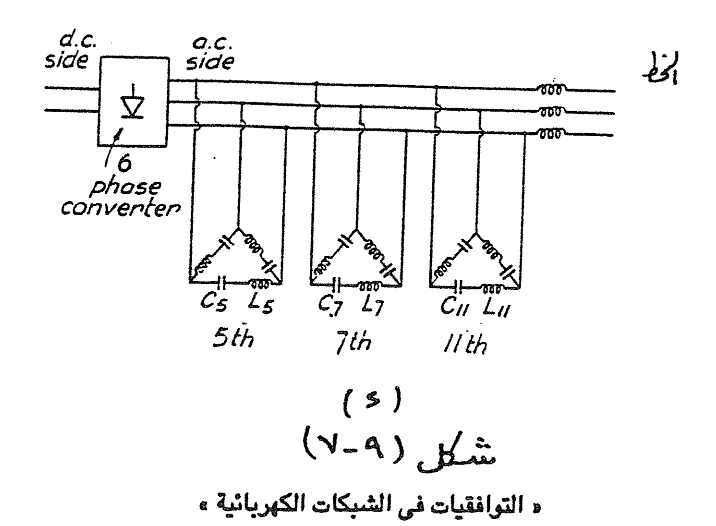
١ - يسلط تيار التوافقية الناتج من الاحمال غير الخطية على دائرة تتكون من مرشح



(ب)   (أ)



(حـ)



(د)

شكل (٩-٧)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

على التوازى مع شبكة التغذية ، كما فى شكل (١٠-٧) عند ترددات مناسبة وتحسب جهود التوافقيات .

٢ - من نتائج البند رقم (١) نحسب الثوابت الآتية :

أ - تشوه الجهد (Voltage Distortion) ويرمز له .VD

$$VD = \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^2 + \ldots\ldots} = \left(\sum_{n=2}^{n} V_n^2\right)^{1/2} / V_1$$

ب - عامل تأثير التليفون (Telephone influence factor) ويرمز له بالرموز TIF

$$TIF = \frac{1}{V}\left[\sum_{n=1}^{n}(K_f P_p V_f)^2\right]^{1/2}$$

حيث :

V = جذر متوسط مربعات الجهد للخط .

V_f = جهد التوافقية عند التردد f

K_f = معامل الربط (Coupling coefficient) $(K_f = 5f)$

p_f = وزن تردد التوافقية (weight of the harmonic of frequency) وأقصى قيمة لها تساوى واحد عند تردد f يساوى 1000 Hz .

جـ - عامل التيارات الموزونة (weighted currents) ويرمز له IT .

$$IT = I \,.\, (TIF)$$

٣ - بعد ذلك نحسب مكونات المرشح : المكثفات ـ الممانعات ـ المقاومات .

عند تصميم المرشح نحتاج الى البيانات التالية :

أ - مصدر التيار (Current source) والذى يتغير تبعاً لحدود الحمل وحالات زاوية الاشعال (فى حالة استخدام مبدلات استاتيكية) .

ب - مسامحة كل من المرشح والنظام (Filter and system admittances) حيث تحسب اقل مسامحة كلية مكافئة عند كل تردد توافقية والتى تنتج أقصى تشوه فى الجهد . ويمكن بسهولة الحصول على المحل الهندسى (Loci) لمعاوقة (او مسامحة) المرشح بمجرد ان تحدد مكونات المرشح . بينما يكون من الصعب الحصول على المحل

الهندسى لمعاوقة (او مسامحة) النظام لدرجة دقة عالية .

مرشحات التوليف *Tuned Filters*

أ - مرشح التوليف الاحادى *(Single Tuned Filter)*

يتكون مرشح التوليف الاحادى من C,L,R متصلين على التوالى ، كما فى شكل (١١-٧) وتكون معاوقة الدائرة تبعاً للمعادلة الآتية :

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad \text{...........} \ (1)$$

وعند تردد الرنين f_n تصبح قيمة معاوقة المرشح مساوية للمقاومة R .

ويستخدم هذا النوع لتوليف تردد توافقية واحدة . قبل اختيار قيم C,L,R يجب معرفة قيم δ,Q كالآتى :

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}$$

or

$$\omega = \omega_n (1 + \delta)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

حيث ω_n هى التردد الزاوى *(angular frequency)* لمرشح التوليف

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

(تكون ممانعة المفاعلة وممانعة السعوية بوحدات الاوم عند تردد التوليف)

وفى حال مرشح التوليف الاحادى فان عامل الجودة Q يساوى

$$Q = \frac{X_0}{R}$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n RQ}$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n}$$

وبالتعويض عن قيم ω,L,C فى المعادلة رقم (١) نحصل على :

$$Z_f = R\left\{1 + jQ\delta\left(\frac{2+\delta}{1+\delta}\right)\right\}$$

وتكون قيمة δ صغيرة بالمقارنة بالواحد الصحيح فان Z_f تصبح

$$Z_f \simeq R(1 + j\,2\,\delta Q) = X_0\left(\frac{1}{Q} + j\,2\delta\right) = R_f + j\,X_f \quad ---- \quad (2)$$

$$|Z_f| \simeq R\sqrt{(1 + 4\,\delta^2 Q^2)}$$

كما أنه من المناسب ، عند تصميم المرشحات ، استخدام المسامحة Y بدلاً من المعاوقة Z ، وعلى ذلك فان مسامحة المرشح

$$Y_f \simeq \frac{1}{R(1 + j2\delta Q)} = G_f + jB_f$$

حيث :

$$G_f = \frac{Q}{X_0(1 + 4\,\delta^2 Q^2)}$$

$$B_f = \frac{2\,\delta Q^2}{X_0(1 + 4\,\delta^2 Q^2)}$$

اما جهد التوافقية V_n عند القضبان الموصل عليها المرشح يكون

$$V_n = \frac{I_n}{Y_{nf} + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n}$$

ولتقليل جهد التوافقية فمن الضرورى زيادة المسامحة الكلية (Y_n) للمرشح المتصل على التوازى مع مصدر التغذية .

حيث :

Y_{nf} مسامحة المرشح .

Y_{sn} مسامحة المصدر (او النظام)

ويلاحظ من المعادلات السابقة ان Y_f تتناسب عكسياً مع δ وان V_n تتناسب ايضاً عكسياً مع Y_f وعلى ذلك فانه كلما زادت δ كلما زادت جهود التوافقية V_n .

وتكون قيمة جهد التوافقية $/V_n/$ تبعاً للمعادلة :

$$/V_n/ = I_n / \{ (G_{sn} + \frac{1}{R(1+4Q^2\delta^2)})^2 + (B_{sn} - \frac{2Q\delta}{R(1+4Q^2\delta^2)})^2 \}^{1/2}$$

ويتحدد المحل الهندسى لمعاوقات التوافقيات(*Harmonic impedances*) بخطين مستقيمين ودائرة تمر بنقطة الاصل وذلك على المحاور R,jX ويمكن ان نحدد اقصى زاوية مرحلية (*phase angle*) لمعاوقة شبكة المصدر بان تكون اقل من ٩٠° وهى على العموم تقل كلما زاد التردد (ماعدا فى شبكات الكابلات لدرجات التوافقيات العالية) . وعلى ذلك نحصل على اقصى جهد توافقية باستخدام الزاوية Φ_{sn} بأشارة مخالفة لاشارة δ .

وتصبح معادلة القيمة $/Vn/$ كالآتى :

$$/V_n/ = I_n / \{ (/Y_{sn}/ \cos \Phi_{sn} + G_f)^2 + (- /Y_{sn}/ \sin \Phi_{sn} + B_f^2) \}^{1/2}$$

وذلك بأخذ Φ_{sn} موجبة ، δ سالبة .

وتكون قيمة $/y_{sn}/$ التى تعطى اقصى $/V_n/$ هى

$$/Y_{sn}/ = \frac{\cos \Phi_{sn} (2Q\delta \tan \Phi_{sn} - 1)}{R(1+4Q^2\delta^2)}$$

عندئذ تكون $/Vn/$ كالآتى :

$$/V_n/ = I_n \omega_n L \left[\frac{1+4Q^2\delta^2}{Q(\sin \Phi_{sn} + 2Q\delta \cos \Phi_{sn})} \right]$$

وتكون قيمة Q المثالية التى تعطى اقل جهد توافقية هى :

$$Q = \frac{1+\cos \Phi_{sn}}{2\delta \sin \Phi_{sn}}$$

$$\therefore /V_n/ = I_n \delta \omega_n L \left[\frac{4}{1+\cos \Phi_{sn}} \right] = \frac{2 I_n R}{\sin \Phi_{sn}}$$

ويجب ملاحظة ان المرشحات لاتصمم لاعطاء اقل توافقيات فى الجهد عند هذة الشروط ، ولكن تختار Q أعلى للوصول الى اقل فقد .

وتستخدم طريقة رسم المتجهات للمساعدة فى اختيار قيمة Q المثلى ، أو بمعنى آخر لاختيار القيمة القصوى للمسامحة Y_n

وللحصول على اقصى قيمة لعامل انحراف التردد *(Frequency deviation factor)* (والذى يرمز له بالرمز δ_m) وباستخدام ممانعة X_0 ثابتة ومقاومة R متغيرة فان المحل الهندسى لمسامحة المرشح Y_f تكون نصف دائرة كما فى شكل (١٢-٧) تبعاً للمعادلةالآتية

$$Y_f = \frac{1}{R(1+j\,\delta Q)}$$

حيث :

δ = عامل انحراف التردد

Q = عامل الجودة

اما قطر الدائرة فيساوى $\frac{1}{2\,\delta_m X_0}$ وتمس الدائرة المحور G عند نقطة الاصل كما فى شكل (١٢-٧) ، وتمثل المساحة المظللة فى الشكل المحل الهندسى لمسامحة النظام Y_{sn} ، والتى نحصل عليها بعكس المحل الهندسى للمعاوقة ، وتقع اقل مسامحة لكل تردد فى حدود المساحة المظللة .

يكون اقل متجة للمسامحة المعطاه Y_{nj} هى Y_n والتى تتعامد على المساحة المظللة عند النقطة E ، ونلاحظ فى شكل (١٢-٧) ان رسم المتجهات عند δ_m موجبة والزاوية Φ سالبة وتساوى Φ_m ولذلك نحصل على اعلى جهد توافقية . وتكون الحالة المثالية عند النقطة D والتى تحقق :

اقصى V_n عند Y_{nf}

اقل V_n عند Y_{sn}

ومن الشكل نجد ان :

$$|Y_{nf}| = \frac{\cos(\Phi_m / 2)}{2\,\delta_m X_0}$$

$$|Y_n| = |Y_{nf}| \cos(\Phi_m/2) = \frac{1 + \cos\Phi_m}{4\,\delta_m X_0}$$

ويكون عامل الجودة بعد اختيار Y_{nf}

$$\tan \Phi_f = \frac{X_f}{R} \quad , \quad Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_0}{X_f / \tan \Phi_f}$$

ومن المعادلة رقم (٢) فان

$$X_f = 2\, \delta_m X_0$$

ومن الشكل رقم (١٢-٧) فان

$$\tan \Phi_f = \cot (\Phi_m/2)$$

فتصبح معادلة عامل الجودة كالآتى :

$$Q = \frac{\cot (\Phi_m/2)}{2\, \delta_m} = \frac{\cos(\phi_m / 2)}{2\, \delta_m \sin(\phi_m / 2)}$$

بعدإيجاد قيم Q لمرشح التوليف ، وباستخدام عناصر المرشح نوجد مسامحة الشبكة Y_n التى تؤدى الى اقل مسامحة كلية Y عند كل تردد توافقية ، مع مراعاة ان اقل مسامحة للنظام تكون محددة باقل موصولية *(conductance)* مثل الناتجة فى رسم متجهات المسامحة الموضح بشكل (١٣-٧) .

عند اى تردد توافقية ، تتكون المسامحة المكافئة للمرشح من المتجه الذى ينتهى عند النقطة O ويبدأ الى احد المناطق الثلاثة المحددة بشكل (١٣-٧) .

وعند الترددات التى تم تجهيز المرشح عندها فان طبيعة مسامحة المرشح تشابه الاوضاع فى المنطقة الثالثة ، اى تكون مسامحة المرشح الكلية كبيرة نسبياً . بينما عند الترددات الاخرى تقع المسامحة فى المنطقة الاولى او الثانية .

وتكون اسوأ قيم لمسامحة الشبكة تلك الناتجة من أقل مسامحة كلية والتى تعرف من الشكل كالآتى :

- فى المنطقة رقم ١ - نهاية محصلة قيمة المسامحة y_n على الجزء الرأسى للحدود (ويقابلها اقل موصولية)

- فى المنطقة رقم ٢ - نهاية Y_n عند ركن الحدود .

- فى المنطقة رقم ٣ - تتعامد Y_n بالقرب من الحد الزاوى *(angular limit)* .

ب - مرشحات التوليف المزدوج *(Double Tuned Filters)*

يوضح شكل (١٤-٧) ب تركيب مرشح توليف مزدوج يكافئ مرشحى توليف احادى ، متصلين على التوازى والموضحين بشكل (١٤-٧) أ ، وللدائرتين نفس تردد الرنين ، وتكون العلاقة بين عناصر الدائرتين كالآتى :

$$C_1 = C_a + C_b$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b)(L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2}$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b}$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)}$$

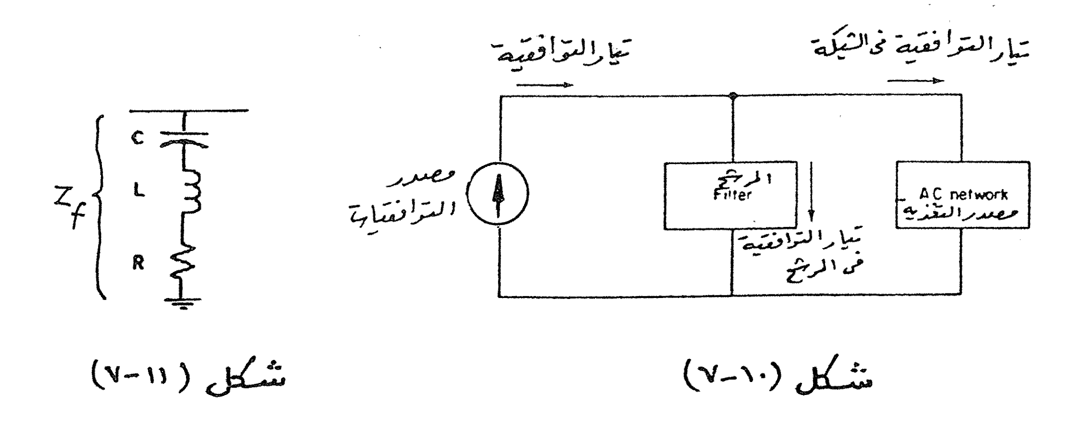
$$R_2 = R_a \left[\frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)}\right] + R_b \left[\frac{1-x^2}{(1+ax^2)^2(1+x^2)}\right] + R_1 \left[\frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+x^2)^2(1+ax^2)}\right]$$

حيث :

$$x = (L_b C_b / L_a C_a)^{1/2} \quad , \quad a = \frac{C_a}{C_b}$$

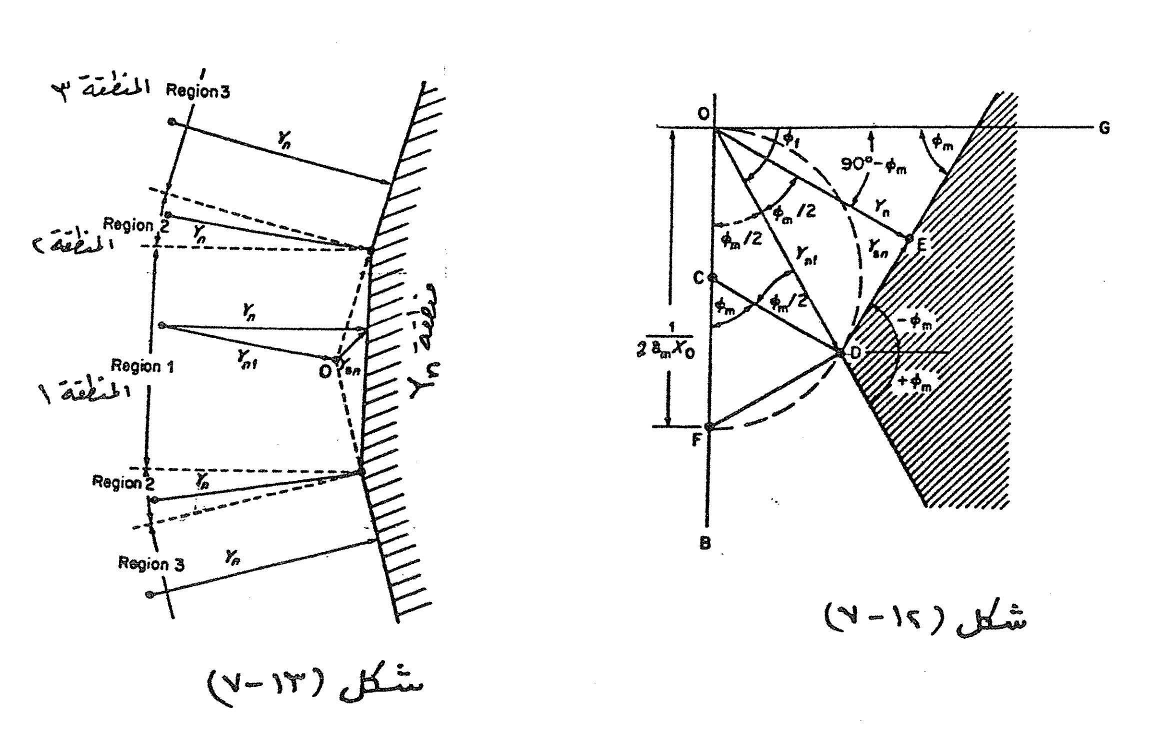
واذا امكن تقليل المقاومة R_1 للمفاعل L_1 فانه يتم حذفها من المعادلة السابقة.وهذا يؤدى الى ميزة انخفاض مفقودات القدرة عند التردد الاساسى بالمقارنة بمرشح توليف احادي . وتعتبر الفائدة الرئيسية لمرشحات التوليف المزدوج هى الاستخدام فى تطبيقات الجهود العالية حيث يقل استخدام عدد المفاعلات (L) والتى تتعرض لجهود النبضات الكلية للخط .

ويوضح شكل (١٤-٧) جـ مثالاً لخاصية مرشح توليف مزدوج حيث يحدث له رنين عند التوافقيتين الخامسة والسابعة (٢٥٠ ، ٣٥٠ هرتز)



شكل (١١-٧)

شكل (١٠-٧)



شكل (١٣-٧)

شكل (١٢-٧)

ويعطى شكل (١٤-٧) ء مثالاً آخر لمرشح له رنين عند الترددين (٣٠٠ ، ٤٠٠ هرتز) .

وعند تصميم مرشح التوليف ، فانه يمكن تقليل انحراف اقصى تردد وذلك بإختيار مرشحات قابله للتوليف عن طريق التشغيل الآلى للمكثف او بتغيير قيمة المفاعله ، وتكفى الحدود ± ٥ ٪ . وفى مبدلات التيار المستمر (*d.c*) ذات الجهود العالية يستخدم نظام التحكم والذى يقيس القدرة غير الفعالة عند ترددات التوافقيات للمرشح ويتحكم فى L او C والتى بدورها تؤثر فى أشارة وقيمة القدرة غير الفعالة .

وتمتاز مرشحات التوليف التى تحتوى على نظم تحكم عن مرشحات التوليف الثابتة فى النقاط الآتية :

١ - ان القدرة المقننة للمكثف اقل

٢ - أن للمكثف معامل درجة حرارة مرتفع (*high temperature coefficient*) وارتفاع فى القدرة غير الفعالة المقننة / وحدة الحجم / وحدة التكلفة .

٣ - نتيجة ارتفاع قيمة Q فان فقد القدرة يقل .

وعلى ذلك فان الميزتين ١ ، ٢ يقللان تكاليف المكثف بينما الاخيرة فتقلل تكاليف المقاومة وبالتالى تكاليف فقد القدرة .

مرشحات الاخماد (*Damped filters*)

فيما يلى توضيح لبعض انواع مرشحات اخماد امرار الترددات العالية

أ - مرشح الدرجة الاولى (*First order filter*)

يتكون هذا المرشح من مقاومة ومكثف كما فى شكل (١٥-٧) ، ويكون المكثف كبيراًوبالتالى يكون فقد ه كبيراً عند التردد الاساسى .

ب - مرشح الدرجة الثانية (*Second order filter*)

أن هذا المرشح من الانواع الجيدة ولكن مفقوداته عند التردد العالى اكبر من مفقودات مرشح الدرجة الثالثة ، ويوضح شكل (١٦-٧) مكونات هذا النـــوع ، وخاصيـــة العلاقة بين مكوناته والعلاقة بين ω, Z .

جـ - مرشح الدرجة الثالثة (*Third order filter*)

ويوضح شكل (١٧-٧) أ مكونات هذا النوع علماً بان قدرة المكثف C_2 اصغر من قدرة المكثف C_1 ويمتاز بأنخفاض المفقودات .

ء - مرشح النوع C *(C - type filter)*

يمتاز هذا النوع بانخفاض المفقودات عند التردد الاساسى حينما تكون L,C_2 توليف توالى عند نفس التردد وهذا المرشح اكثر حساسية لانحراف التردد الاساسى والتغيير فى مكوناته . ويوضح شكل (١٧-٧) ب مكونات المرشح .

وتمتاز مرشحات الاخماد بالآتى

١ - ان عمل وحمل المرشح اقل حساسية لتغييرات درجات الحرارة ولانحراف التردد ولسماحية تصنيع المكونات وللفقد فى المكثفات .

٢ - تغيير معاوقة منخفضة لطيف عريض للتوافقيات .

ومن عيوب مرشحات الاخماد ارتفاع المفقودات .

ويراعى عند تصميم مرشحات الاخماد اختيار عامل الجودة Q بحيث يعطى افضل خاصية تغطى مدى التردد المطلوب ولاتختار افضل Q ؛ كما فى حالة مرشحات التوليف . كما نحتاج للكميتين الآتيتين لتحديد ملامح مرشح الاخماد .

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi C R}$$

$$m = \frac{1}{R^2 C}$$

حيث ان القيمة النموذجية للكمية m بين ٠,٥ - ٢ ، ولقيمة محددة للمكثف يمكن الحصول على قيمتى L,R للوصول الى مسامحة عالية لتغطى مدى التردد المطلوب .

وفى حالة مرشح اخماد الدرجة الثانية فان الموصولية *(Conductance)* والتقلبية *(susceptance)* لمسامحة المرشح تكون :

$$G_f = \frac{m^2 x^4}{R_1 \left[(1 - m x^2)^2 + m^2 x^2\right]}$$

$$B_f = \frac{x}{R_1}\left[\frac{1 - mx^2 + m^2x^2}{(1-mx^2)^2 + m^2x^2}\right]$$

حيث $x = \frac{f}{f_0}$

$$Y_f = G_f + jB_f$$

كما أن اقل قيمة للمساحة الكلية (وهى مجموع مساحة المرشح Y_f ومساحة الشبكة Y_{sn}) كالآتى :

$$Y = B_f \cos \Phi_m + G_f \sin \Phi_m$$

وحتى تكون المعادلة Y موجبة و x اقل من القيمة المعطاه فان

$$|\cot \Phi_f| = |G_f / B_f| = |\tan \Phi_m|$$

وبذلك نتبين انه كلما كبرت قيمة x نحصل على اقل مساحة كلية وهى مساوية لمساحة المرشح (اى ان $Y_{sn} = 0$).

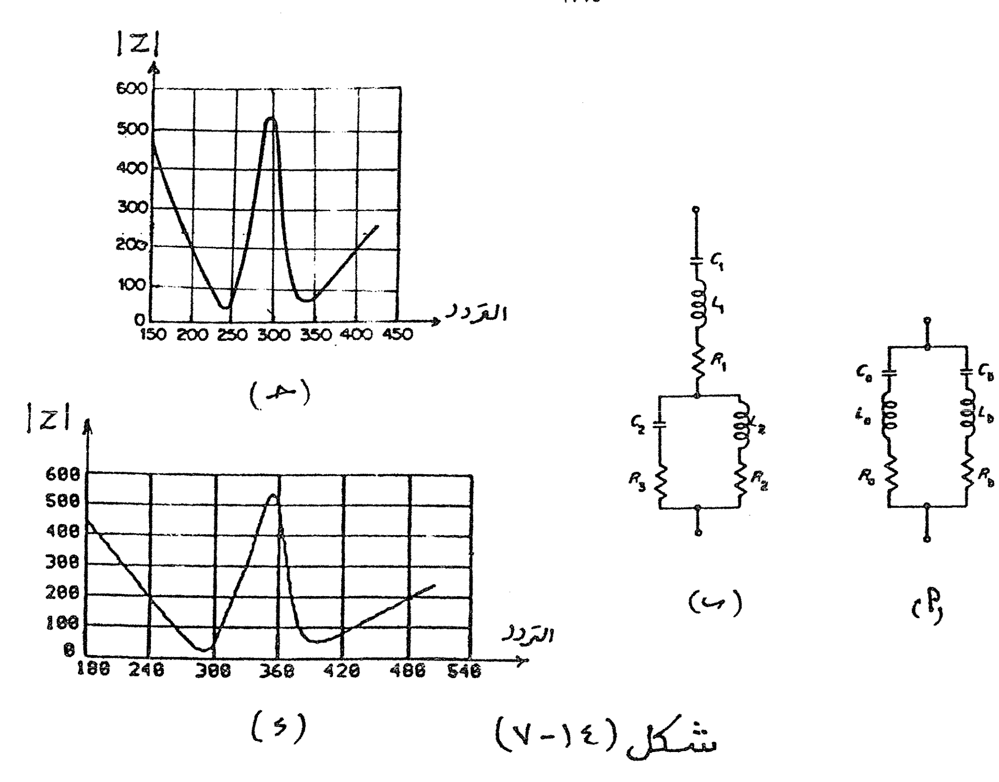
ويوضح شكل (١٨-٧) اقل مساحة نموذجية لمرشح اخماد الدرجة الثانية متصل على التوازى مع شبكة مفقوداتها مهملة (اى ان $\Phi_m = \pm 90^o$) ويبين الشكل الآتى :

- المنحنيات ارقام $1,2,3,4$ لقيم $m = 0.25 , 0.2 , 1 , 2$ على التوالـى وعند $\Phi_o = \pm 90^o$ وأية قيمة لمعاوقة الشبكة Z_0 .

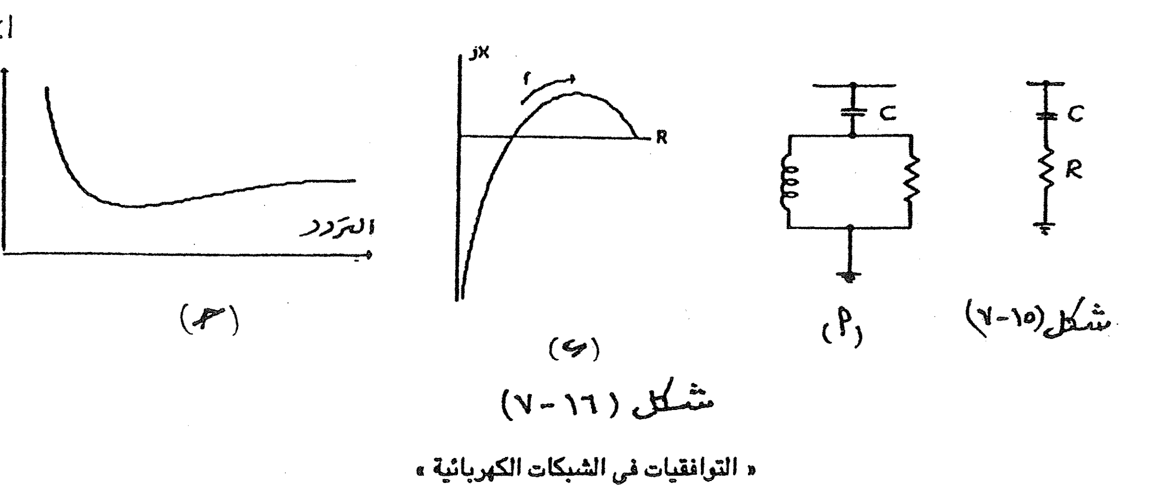
بينما يوضح شكل (١٩-٧) العلاقة بين G ، وتردد مرشح اخماد الدرجة الثالثة عند تساوى المكثفين $C_1 = C_2 = C$ ولقيم $m = 0.5 , 1 , 2$ ويلاحظ ان قيم الذروة للمنحنى اكثر حدة عن حالة مرشح الدرجة الثانية .

مرشح مؤلف *(Composite Filter)*

يستخدم هذا النوع للتخلص من اكثر من درجة توافقية ، ويتكون من عدد من مرشحات الامرار النطاقى تبعاً لعدد درجات التوافقيات التى يراد التخلص منها ويضبط كل منها على توافقية محددة ، هذا بالاضافة الى ان مرشح امرار الترددات العالية يصمم بحيث تكون معاوقته صغيرة لجميع الترددات اعلى من او اقل من تردد معين ويوضح شكل (٢٠-٧) أ مكونات مرشح مؤلف يحتوى على مرشحى امرار نطاقى للترددين f_1 , f_2 وكذلك مرشح امرار الترددات العالية التى تكون مساوية او اكبر من التردد f_3 ، كما يوضح شكل (٢٠-٧) ب العلاقة بين R , Z لهذا المرشح عند تغيير التردد f .

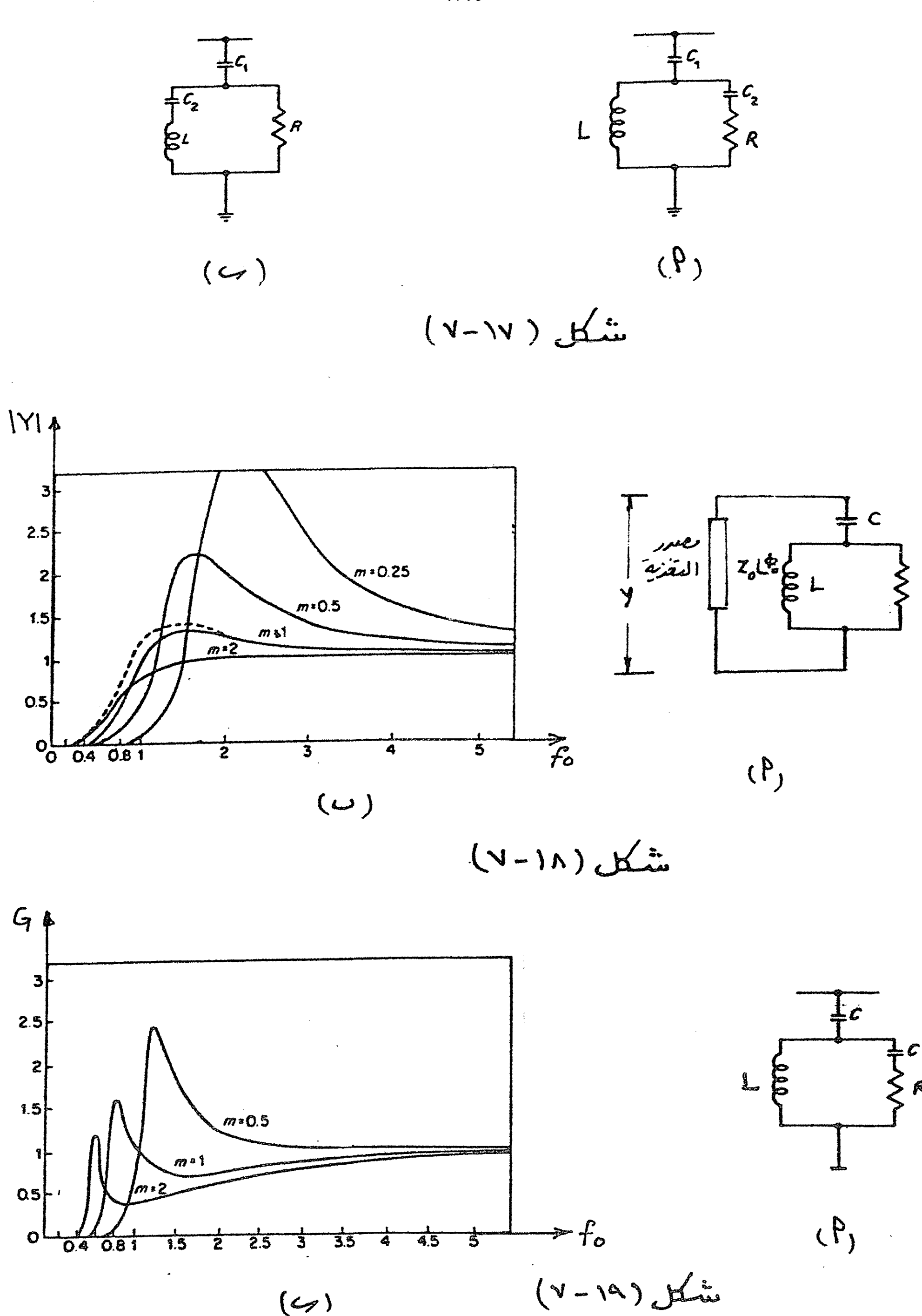


شكل (٧-١٤)



شكل (٧-١٥)

شكل (٧-١٦)



شكل (٧-١٧)

شكل (٧-١٨)

شكل (٧-١٩)

وتحتاج المبدلات الاستاتيكية (Static convertors) ذات القدرات العالية والتى تتكون من ٦ او ١٢ نبضة الى مرشحات للتخلص من التوافقيات الخامسة ـ السابعة ـ الحادية عشر .. وفى هذه الحالة تستخدم مجموعة من مرشحات الامرار النطاقى لدرجات التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر ... ومرشح امرار الترددات العالية لدرجة التوافقيات ١٧ والاعلى منها .

وفيما يلى مثالاً عملياً لتصميم مرشح من هذا النوع .

مثال(١-٧)

مبدل ٦ نبضات مقنناته كالآتى :

rated voltage = 100 kv

rated power = 100 Mw d.c

$\alpha = 15^{o}$

ويتصل المبدل بشبكة جهد *275 kv* ترددها *50 Hz* من خلال محول بياناته كالآتى :

275 kv / 83 kv

Z % = 15 %

Secondary fundamental current = 780 A

Primary fundamental current = 236 A

وقد استخدم مرشح ، على الجانب الابتدائى للمحول . عبارة عن مرشحات توازى للامرار النطاقى للتوافقيات الخامسة ـ السابعة ـ الحادية عشر ـ الثالثة عشر بالاضافة الى مرشح امرار الترددات العالية للتوافقيات السابعة عشر والاعلى منها .

وتكون القدرة الكلية للمرشح *50 MVAr* ، ويوضح شكل (٢١-٧) أ مكونات المرشح ، وبفرض ان :

Capacitance temperature coefficient = 0.05 % / C ^{o}

Inductor temperature coefficient = 0.01 % / C ^{o}

Ambient temperature = $\pm 20\ ^{o}C$

Frequency tolerance $= \Delta f / f = \pm 1\ \%$

اوجد قيم R,L,C لكل فرع فى المرشح .

الحل :

بواسطة قيمة القدرة الكلية للمرشح نحسب السعوية الكلية للمكثفات

$$C_t = \frac{MVAr \times 10^6}{2\ \pi f\ (kv)^2}$$

$$= \frac{50 \times 10^6}{2\ \pi \times 50 \times (275)^2} \simeq 2.085 \qquad \mu F$$

وبقسمة هذه السعوية بالتساوى على جميع أفرع المرشح فان سعوية كل فرع تكون

$$C_t = 5\ C$$

$$\therefore\ C = 0.417 \mu F$$

ولحساب قيم L,R نحتاج الى المعادلات الآتية :

$$C = \frac{1}{\omega_n R\ Q}$$

$$L = \frac{RQ}{\omega_n}$$

$$Q = \frac{Cos\ \Phi_m + 1}{2\ \delta_m\ Sin\ \Phi_m}$$

$$\delta_m = \frac{\Delta f}{fn}\ [\ 1 + \frac{1}{2}\ (\ \frac{\Delta L}{Ln} + \frac{\Delta C}{Cn}\ )]$$

يجب مراعاة انه يمكن اخذ أية قيمة لمعاوقة النظام ولكن يجب ان تكون زاوية النظام Φ_m محددة بأقل من ٧٥° عند اى تر دد ونحسب اولاً كل من Q , δ_m كالآتى:

$$\delta_m = \frac{1}{100} \{\ 1 + \ \frac{1}{2}\ (\ 0.05 \times 20 + 0.01 \times 20)\} = 0.016$$

وتكون افضل قيمة للثابت Q الذى يعطى اقل جهد توافقيات يساوى

$$Q = \frac{1 + \cos 75^{o}}{2\,(0.016)\,\sin 75^{o}} = 41$$

وباستخدام قيم Q, C وتردد التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر والثالثة عشر نحصل على قيم L,R لكل فرع كالآتى :

مرشح التوافقية الخامسة :

$$C = 0.417\ \mu F$$

$$f_5 = 5 \times 50 = 250\ Hz$$

$$C = \frac{1}{\omega_n RQ}$$

$$\therefore\ R = \frac{1}{0.417 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 250 \times 41} \simeq 37\ \Omega$$

$$L = \frac{RQ}{\omega_n}$$

$$= \frac{37 \times 41}{2\,\pi \times 250} \simeq 0.974\ H$$

وبنفس الطريقة تحسب L,R عند تردد التوافقيات السابعة والحادية عشر والثالثة عشر

مرشح التوافقيات السابعة عشر والاعلى منها (مرشح اخماد) :

بفرض ان : $m=1$

$$C = 0.417\ \mu F$$

$$f_o = 17 \times 150 = 850\ Hz$$

باستخدام المعادلتين

$$f_o = \frac{1}{2\,\pi\,CR}$$

$$m = \frac{L}{R^2 C}$$

يمكن حساب L,R

$$R = \frac{1}{2\,\pi \times 850 \times 0.417 \times 10^{-6}} \simeq 452\ \Omega$$

$$L = 1 \times (452)^2 \times (0.417 \times 10^{-6}) \simeq 0.085\ H$$

ويوضح شكل (٢١-٧) ب قيم C,L,R لكل مرشح توافقية .

وعند استخدام مبدل ١٢ نبضة فيتم حذف مرشحى التوافقيتين الخامسة والسابعة ويصبح المرشح كما فى شكل (٢٢-٧) أ . ويوضح شكل (٢٢-٧) ب العلاقة بين Z,R كدالة فى التردد لهذا المرشح ، ويوضح المحل الهندسى للمعاوقة وتكون نقط الرنين عند التوافقيات الحادية عشر والثالثة عشر والسابعة والعشرين .

وللمقارنة يتضح من الشكل (٢٣-٧) المحل الهندسى لمعاوقة مرشح التوافقيتين الخامسة والسابعة كدالة فى التردد (٦٠ هرتز) ، ويمر المحل الهندس للمعاوقة المركبة *(complex impedance)* بالمحور R $(x=0)$ اى عند ترددى التوليف ٣٠٠ ، ٤٢٠ هرتز كما تلاحظ الازاحة الحادثة فى المحل الهندسى والتى ترجع الى مقاومة مفاعلات التوليف .

فعند استخدام المرشح المبين فى شكل (٢٢-٧) أ ولكى نحذف التوافقيات الحادية عشر والثالثة عشر والتوافقيات الاعلى ، فان لهذا المرشح تاثيراً كبيراً فى تقليل التوافقيات غير المرغوبة ، ويرجع هذا الى ان اختيار اقل حجم للمرشحات يعتمد على :

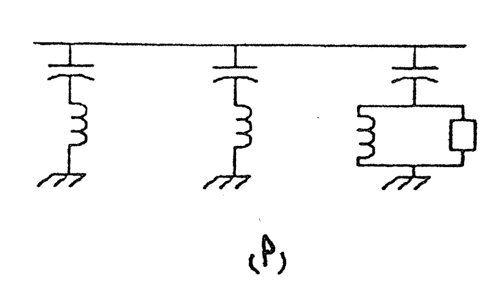
- استخدام وحدات المكثفات ذات الاحجام الاقتصادية المتاحة .
- اقل كمية قدرة غير فعالة مولدة مطلوبة للمبدل .

وعلى هذا يمكن تبسيط تصميم المرشح كالآتى :

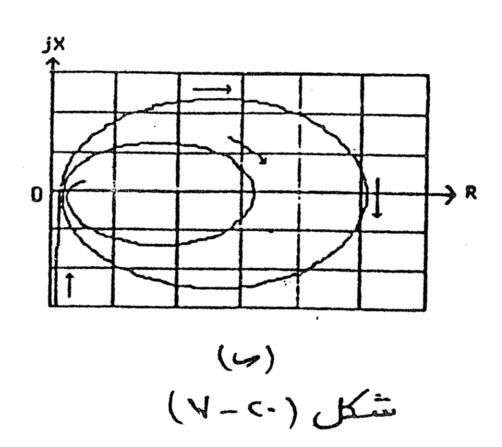
١ - اما استبدال مرشحات التوليف للتوافقيتين الحادية عشر والثالثة عشر بمرشح احادى *(single filter)* من نوع الاخماد .

٢ - او باستبدال كل المرشحات بمرشح اخماد احادى .

فى الحالة الاولى ، يجب ان يولف مرشح الاخماد الذى حل محل مرشحى التوليف عند حوالى التوافقية الثانية عشر ، ويتم اختيار العامل Q بقيمة بين ٢٠ -٥٠ بينما مرشح الاخماد للتوافقيات العالية يختار Q له بين ٢-٤ . وفى الحالة الثانية ، فان مرشح الاخماد الاحادى يولف ايضاً عند حوالى التوافقية الثانية عشر بينما تختار Q بين ٢-٦ للحصول على معاوقة منخفضة عند الترددات العالية .

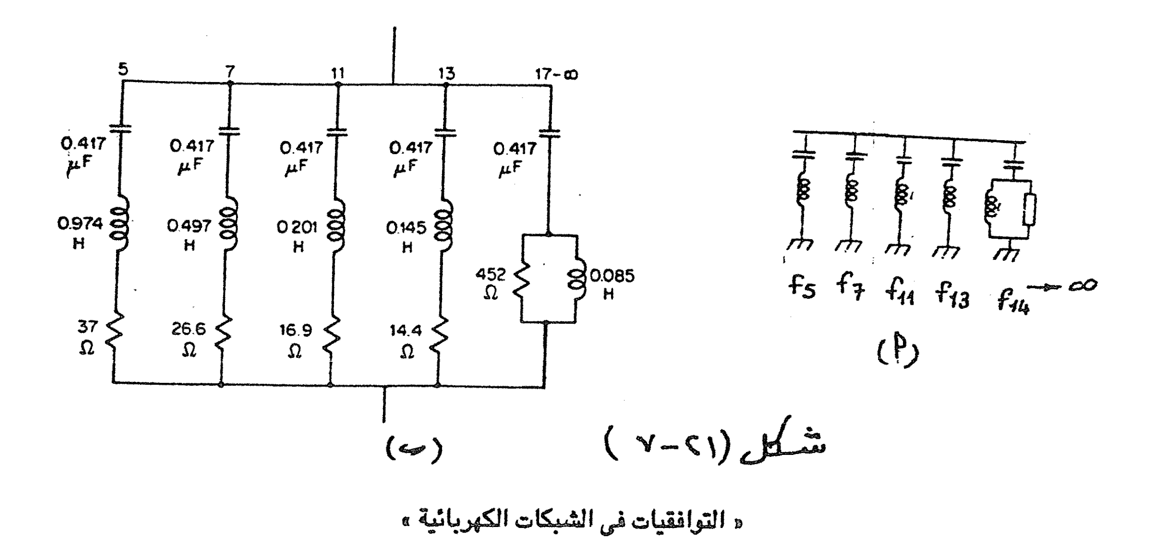


(أ)



(ب)

شكل (٢٠ - ٧)



(ب) (أ)

شكل (٢١ - ٧)

للمقننات الكبيرة الحديثة للمشروعات التى تحتاج جهود التيار المستمر العالية ، فانها تكون معرضة لزيادة احتمال رنين توافقيات الدرجات المنخفضة بين معاوقة النظام ومكثف المرشح .

ويعتمد رنين مرشح التوالى او التوازى على ما اذا كان مصدر التغذية *(a.c)* او المبدل هو مصدر توافقيات الدرجات المنخفضة . ففى النظام غير المتزن نجد ان تيار التوافقية الثالثة ينتج من المبدلات وعلى ذلك فان التوافقية الثالثة الناتجة عبارة عن مركبة التتابعية الموجبة ، ولاتمتص بملفات الدلتا للمحول .

وبذلك فان البديل المفضّل لحذف رنين الدرجات المنخفضة عبارة عن توليفة من مرشح النوع C *(C- type filter)* ومرشح اخماد الدرجة الثانية *(Second - order damped filter)* والموضح فى شكل (٢٤-٧) .

العلاقة بين مستوى قصر الشبكة وقدرة مصدر التوافقيات

امكن الوصول الى العلاقة بين مستوى قصر الشبكة *(Short circuit power)* والقدرة الكلية للمعدات المصدرة للتوافقيات على الشبكة الكهربائية (كالمبدلات الاستاتيكية ـ معدات السرعات المتغيرة .....) وذلك لتحديد احتياج الشبكة الى تركيب مرشحات كالآتى :

أ - اذا تحقق الشرط

$$G_h \leq \frac{S_{syst}}{120}$$

حيث :

G_h = القدرة الكلية للمعدات المصدرة للتوافقيات

S_{syst} = قدرة مستوى قـــصر الشبكة .

فانه يمكن تركيب مكثفات قياسية لتحسين معامل القدرة عند الحاجة

ب - اذا تحقق الشرط

$$\frac{S_{syst}}{120} < G_h \leq \frac{S_{syst}}{70}$$

فانه يمكن تركيب مكثفات تتحمل جهد زائد ١٠ ٪ لتحسين معامل القدرة عند الحاجة

جـ- اذا تحقق الشرط

$$G_h > \frac{S_{syst}}{70}$$

فان الشبكة تحتاج لتركيب ممانعات ومكثفات تتحمل جهد زائد ١٠ ٪ اى تحتاج لتركيب مرشحات .

مثال(٢-٧)

مبدل ١٢ نبضة قدرته $1000\ KVA$ متصله بنقطة الربط المشترك (PCC) على قضبان لها مستوى قصر $50\ MVA$ هل نحتاج لتركيب مرشحات ؟

الحل :

$$S_{syst} = 50\ MVA$$

$$G_h = 1000\ KVA$$

$$\frac{S_{syst}}{120} = \frac{50000}{120} = 416.6$$

$$\frac{S_{syst}}{70} = \frac{50000}{70} = 714$$

وعلى ذلك يتحقق الشرط

$$G_h > \frac{S_{syst}}{70}$$

اى تحتاج هذه الشبكة لتركيب مرشح ويتحمل المكثف جهد زائد ١٠ ٪ .

تصميم مرشح توالى يتكون من L,C

المعطيات :

١ – جهد الشبكة V_s بوحدات kv .

٢ – القدرة غير الفعالة للمرشح بوحدات $KVAr$.

٣ – تردد التوليف او درجة التوافقية n .

المطلوب :

١ – الجهد المقنن لتشغيل المكثف (الجهد بين وجهين)

٢ - قيمة L بوحدات هنرى .

٣ - تيار تشغيل المكثف (والمفاعل) بالامبير .

خطوات الحل :

١ - عند التردد الاساسى تكون معادلتى الجهد للمكثف وللمفاعل تبعاً لقيمة درجة التوافقية التى سيصمم عندها المرشح (n) . كما فى شكل (٢٥-٧) .

$$V_c = V_s \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

$$V_L = V_s \frac{1}{n^2 - 1}$$

ونحسب جهد الخط $(L\text{-}L)$ لتشغيل المكثف Vc تبعاً للمعادلة السابقة .ثم نحسب جهد الوجه $(L\text{-}N)$ لتشغيل المكثف . $\frac{V_c}{\sqrt{3}}$

٢ - نحسب القدرة غير الفعالة للمفاعل

$$(KVAr)_L = KVAr \times \frac{1}{n^2 - 1}$$

٣ - نحسب القدرة غير الفعالة للمكثف

$$(KVAr)_c = KVAr + (KVAr)_L$$

٤ - نحسب ممانعة المكثف عند التردد الاساسى

$$X_c = \frac{(KV)_{LL}^2}{(KVAr)_c} \quad \Omega$$

٥ - نحسب ممانعة المفاعل عند التردد الاساسى

$$V_L = jX_L I_n = \frac{1}{n^2 - 1} V_f$$

$$V_c = -jX_c I_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} V_f$$

ومن المعادلتين السابقتين نحصل على

ثم نحسب ممانعة المفاعل

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad Henry$$

٦ - نحسب تيار تشغيل المكثف (والذى يساوى تيار تشغيل المفاعل)

$$I_c = I_L = \frac{(KVAr)_c}{\sqrt{3} KV_{LL}} \; Amp$$

مثال(٣-٧)

شبكة كهربائية جهدها $11kv$ تحتاج لمرشح قدرته الكلية غير الفعالة $3500\ KVAr$ والمطلوب حساب قيم C,L للمرشح عند درجة توافقية $n = 4.8$ (القدرة الكلية غير الفعالة للمرشح هى القدرة اللازمة لتحسين معامل القدرة)

الحل :

جهد الخط $(L\text{-}L)$ لتشغيل المكثف $= V_c = V_s \dfrac{n^2}{n^2 - 1}$

$$= 11 \frac{(4.8)^2}{(4.8)^2 - 1} = 11.499 \; kv$$

جهد الوجه $(L\text{-}N)$ لتشغيل المكثف $= V_c = \dfrac{11.499}{\sqrt{3}} = 6.6468\ kv$

وعلي ذلك يختار الجهد المقنن للمكثف يساوى $11.5\ KV$

القدرة غير الفعالة لتحسين معامل القدرة = القدرة غير الفعالة للمفاعل $KVAr$ $\left(\dfrac{1}{n^2 - 1}\right)$

$$= 3500 \frac{1}{(4.8)^2 - 1} \simeq 159\ KVAr$$

القدرة غير الفعالة للمكثف $kVAr$ $= 3500 + 159 = 3659\ KVAr$.

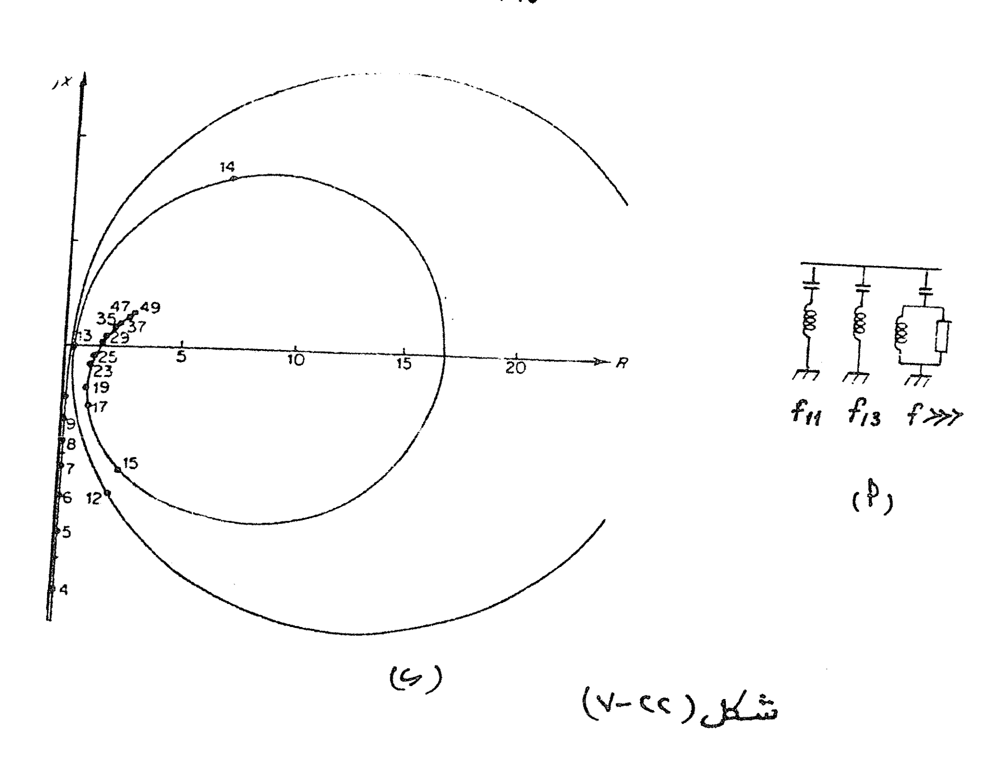
وعلى ذلك نختار قدرة المكثف $3600\ KVAr$ عند جهد الخط $11.5\ KV$.

ممانعة المكثف عند التردد الاساسى $= X_c = \dfrac{(KV)^2}{MVAr} = \dfrac{(11.5)^2}{3.6} = 36.736\ \Omega$

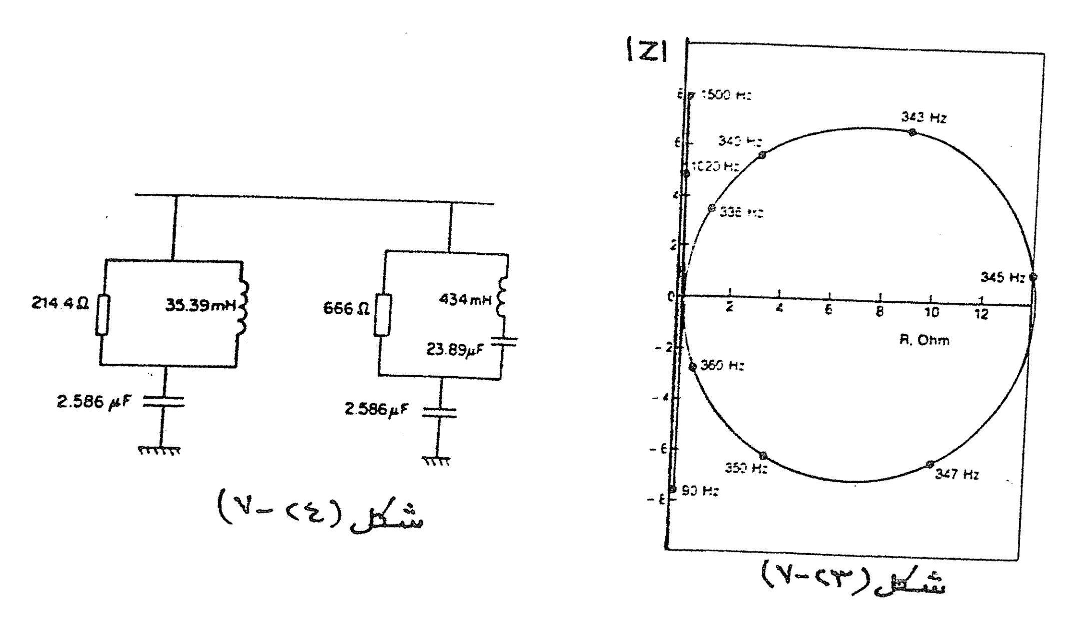
$$\therefore C = \frac{1}{2\pi f (36.736)} = 86.648\ \mu F$$

ثم نحسب ممانعة المفاعل عند التردد الاساسى

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} = \frac{36.736}{(4.8)^2} = 1.594\ \Omega$$



شكل (٢٢-٧)



شكل (٢٤-٧)

شكل (٢٣-٧)

$$X_L = 2\pi f L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{1.594}{2\pi \times 50} = 5.074 \quad mH$$

ثم نحسب تيار تشغيل المكثف (والذى يساوى تيار تشغيل المفاعل)

$$I_c = I_L = \frac{3600}{\sqrt{3} \times 11.5} = 180.95 \text{ Amp}$$

وعلي ذلك تكون البيانات الفنية للمرشح كالآتى والموضحة فى شكل (٢٦-٧)

- المكثف :

3.6 MVAr , 11.5 KV , 36.736 Ω , 86.648 μF , 180.95 Amp

- المفاعل :

11.5 KV , 5.074 mH , 180.95 Amp

خصائص مكونات المرشح :

لو عرفنا جهود التوافقيات والجهد الاساسى عند القضبان المراد تركيب مرشحات عليها ، فانه يمكن حساب الجهد والتيار المقنن لكل من المكثفات والمفاعلات والمقاومات المكونة للمرشح . وايضاً نحسب القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة والمفقودات.

للتغلب على الانهيارات التى يمكن حدوثها على المكونات ، فانه يتم اختيار المقننات على اساس اسوء الحالات المتوقعة ، اي تكون المقننات على الاساس الاتى :

- اقصى جهد اساسى .
- اقصى انحراف فى التردد الفعال .
- تيارات التوافقيات من المصادر الاخرى ومن احتمالات الرنين بين المرشح والشبكة ،

تتكون المكثفات من وحدات قياسية متصلة على التوالي او على التوازى ، او على التوالى والتوازي وذلك للوصول الي الجهد المقنن والقدرة المقننة المطلوبين .

وتكون الخصائص الاساسية للمكثفات هي :

١ - معامل درجة الحرارة *(Temperature coefficient)* للمكثف

يفضل ان يكون معامل درجة الحرارة منخفض جداً لمرشحات التوليف وذلك للتغلب على فض التوليف *(de-tuning)* الحادث من تغيير السعوية مع درجة الحرارة المحيطة او من السخونة الذاتية للمكثفات . ولايوخذ بهذه الخاصية في حالة مرشحات الاخماد او

مكثفات القدرة .

٢ - القدرة غير الفعالة لكل وحدة حجم

يمكن الحصول من المكثفات علي أعلي قدرة غير فعالة لكل وحدة حجم بان تكون المفقودات صغيرة وبالتشغيل عند الجهود العالية . لهذا السبب فان التشغيل عند جهود زائدة يجب الا يسبب اتلاف حراري للعزل ، وان التشغيل لفترة صغيرة عند الجهود العالية يجب ان يمنع التأين الاهلاكى للعزل .

وتكون القدرة غير الفعالة المقننة المرغوبة للمكثف هى مجموع القدرات غير الفعالة عند كل الترددات الموجودة .

٣ - فقد القدرة

٤ - العول *(reliability)*

٥ - التكاليف

عند تصميم المفاعلات المستخدمة للمرشح يؤخذ فى الاعتبار الاتى

- مفقودات الظاهرة السطحية *Skin - effect losses*
- مفقودات التخلفية *Hysteresis losses*
- تأثير مستوى الفيض بالقلب اي حدوث فض التوليف *(de-tuning)* نتيجة الخاصية غير الخطية للدائرة المغناطيسية . ولهذا يفضل ان تكون كثافة الفيض منخفضة عند استخدام القلب الحديدى . ويفضل ان يكون المفاعل من النوع بدون قلب مغناطيسى (هوائى) .

يختار العامل Q عند ترددات التوافقيات الشائعة او السائدة .

وذلك لتقليل التكاليف والذى يكون عادة بين ٥٠ - ١٥٠ ، وعلى ذلك فمن المرغوب ان تكون Q منخفضة ويمكن الحصول على ذلك باستخدام مقاومة على التوالى .

وتعتمد قدرة المفاعل على اقصى تيار جذ ر متوسط المربعات *(r.m.s)* وعلى مستوى العزل المطلوب لتحمل الجهود العابرة والناتجة من عمليات التشغيل .

تكاليف المرشحات :

يتلخص عمل المرشح فى كبح او اخماد التوافقيات بأقل تكلفة ممكنة ونحصل منه على القدرة غير الفعالة بالاضافة الى ذلك فان تكاليف المفقودات بالمرشح توزع بين مصدر القدرة غير الفعالة والمرشح .

وتؤخذ هذه الفروض عادة عند عمل تحليل التكاليف لمكونات المرشح :

١ - في الانشاءات النموذجية تتكون المكثفات من مصفوفة من وحدات المكثفات لكل منها قدرة اسمية عند جهد التشغيل ويوجد مصهر وقاية خارجي .

وتكون تكاليف مصفوفة المكثفات ثابتة تقريباً حتى قدرة معينة ، وللقدرات الاعلى تضاف وحدة او اكثر على كل مجموعة توالي حسب المطلوب ، حتى نصل الى تكاليف دقيقة مقبولة لكل م.ف.أ.ر *(MVAr)* او للحجم *(Size)* . ويعتبر الموقف اكثر صعوبة اذا كانت الوحدات القياسية المتاحة ذات قدرات مقننة مختلفة مثلاً : ٥٠ - ١٠٠ - ١٥٠ - ٢٠٠ ك.ف.أ.ر وبالتالى تتغير الزيادة فى التكاليف للمدى المختلف لاحجام مصفوفة المكثفات . وسنفترض ان تكاليف المكثف تتناسب مع قدرته المقننة

٢ - رغم ان تكاليف المفاعلات تعتمد على طريقة الانشاءات (مثلاً وحدات التبريد بزيت العزل - وحدات التبريد بالهواء الطبيعى ...) فان تكاليفها لا تتغير تغيراً كبيراً للوحدات ذات القدرات المختلفة .

وتكون التكاليف التقريبية المستخدمة فى التحليل تبعاً للمعادلة :

تكاليف المفاعل $= U_K + U_L$ *(total MVAr rating)*

حيث :

$U_K =$ تكاليف ثابتة

$U_L =$ التكاليف التزايدية للمفاعل / القدرة *MVAr*

٣ - ولضبط قيمة Q نحتاج لاضافة مقاومة فى كل فرع،لذلك تضاف قيمة تكاليف ثابتة لكل مقاومة فى عمل الحسابات . وحيث ان تكاليف المقاومة من نوع التبريد بالهواء اقل تكلفة من باقى المكونات . واذا كانت المقاومة من نوع التبريد بالزيت فانها تكون اكثر تكلفة .

٤ - نفترض ان مقاومة المفاعل لحسابات مفقودات القدرة تكون ثابتة عند جميع الترددات .

فيما يلي توضيح هذا على نوعين من المرشحات :

١ - مرشح توليف احادى :

في دائرة المرشح ذات Q عالية فانه يمكن افتراض ان

$$V_c = V_L + V_s$$

حيث :

V_c جهد المكثف

V_L جهد المفاعل

V_s جهد المصدر

ويكون حجم المرشح (S) كالآتى

$$S = \frac{V_s^2}{X_c - X_L}$$

حيث :

X_c مفاعلة المكثف عند التردد الاساسي

X_L مفاعلة المفاعل عند التردد الاساسى

وحيث ان المرشح يولف عند التردد n فان :

$$X_o = nX_L = X_c / n$$

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} \quad , V_L = \frac{V_c}{n^2}$$

$$\therefore S = \frac{V_s^2}{X_c\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}$$

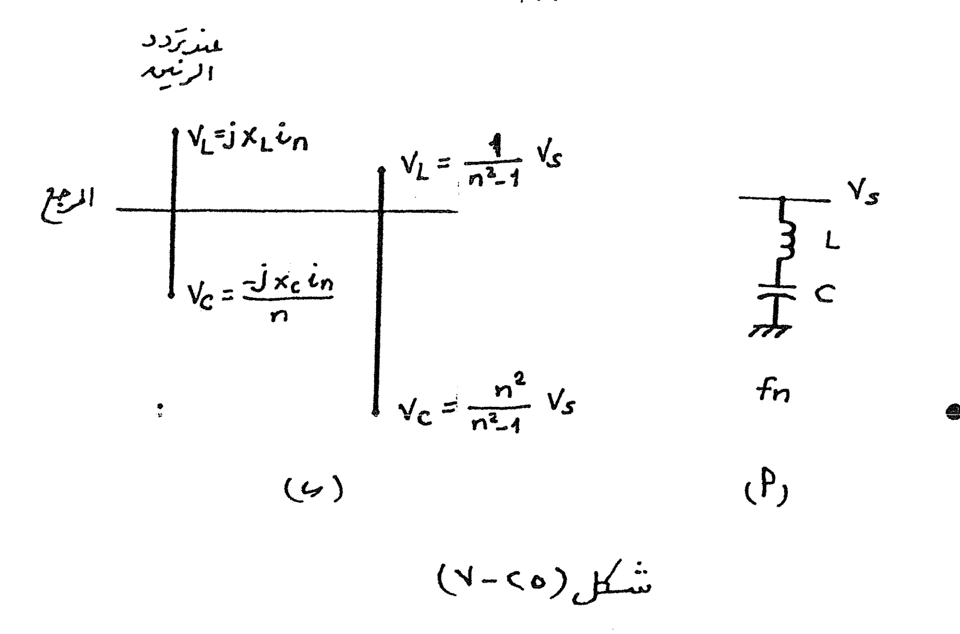
$$= \frac{V_s^2}{X_c} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) \quad MVAr$$

$$V_c - V_L = V_c\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = V_s$$

$$V_s = V_c\left(\frac{n^2 - 1}{n^2}\right)$$

$$V_c = V_s\left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) \qquad KV$$

ونحصل على حمل كل مرشح من تقدير التكاليف كالآتى :



شكل (٢٥-٧)

	المكثف	المفاعل
الجهد (KV)	11.5	11.5
الامبير (A)	180.95	180.95
المحاثة / السعوية (μF) (mh)	86.648	5.074
الممانعة (Ω)	36.736	1.594

5.074 mh

86.648 μF

$f_{4,8}$

شكل (٢٦-٧)

أ - للمكثف :

تكون الاحمال الاساسية

$$\frac{V_c^2}{X_c} = \left(\frac{V_s^2}{X_c}\right)\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)^2$$

$$= S\left[\frac{n^2}{n^2-1}\right] \qquad MVAr$$

وتكون احمال التوافقيات

$$I_n^2\left(\frac{X_c}{n}\right) = \frac{I_n^2 V_s^2}{S\,n}\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) MVAr$$

وتكون مفقودات القدرة (للحمل الكلى)

$$K_{CLt} = K_{cL}\left[S + \frac{I_n^2 V_s^2}{S\,n}\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)\right] \qquad KW$$

حيث K_{CL} = عامل الفقد *(loss factor)* للمكثفات بوحدات *(KW/MVAr)* .

ب - للمفاعل

ان الاحمال الاساسية

$$\frac{V_L^2}{X_L} = \left(\frac{V_c}{n^2}\right)^2\left(\frac{n^2}{X_c}\right) = \frac{V_c^2}{n^2 X_c} = \frac{S}{n^2}\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) MVAr$$

وتكون احمال التوافقيات في حالة المفاعل مساوية لحالة المكثف حيث ان الممانعة متساوية عند تردد التوافقية .

وتحسب مفقودات القدرة كالآتى

تكون المقاومة الفعالة R هى :

$$R = \frac{X_o}{Q} = \frac{X_c}{nQ}$$

والتيار الاساسى I_1 يساوى

$$I_1 = \frac{S}{V_s} \qquad KA$$

وعلى ذلك فان مفقودات القدرة تكون:

$$(I_1^2 + I_n^2)R = \frac{S^2}{V_s^2} \; \frac{X_c}{nQ} + I_n^2 \frac{X_c}{nQ}$$

$$= \frac{S^2}{nQ} \left(\frac{1}{S}\right) \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) + \frac{I_n^2 V_s^2}{nSQ} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right)$$

$$= \left(\frac{S}{nQ} + \frac{I_n^2 V_s^2}{nSQ}\right) \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) X 10^3 \qquad MW$$

وللمقارنة ، يعبر عن تكاليف مفقودات الطاقة بدلالة التكاليف الرئيسية *(Capital cost)* باستخدام عامل القيمة الحالى الآتى :

$$P_v = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N}$$

حيث :

i = معدل الربح *(interest rate)*

N = تكلفة المرشح *(Budgeted filter life)* فى عمر التشغيل

وعلي ذلك فان التكاليف الحالية لمفقودات القدرة تكون :

$$P_v U_u F_u X 365 X 24 X (total\ power\ loss)$$

$$= 8760 \; X P_v U_u F_u X . (total\ power\ loss)$$

وتكون التكاليف الكلية :

$$T.Cost = U_T + \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) \left\{ U_c\left(S + \frac{I_n^2 V_s^2}{nS}\right) + U_L\left(\frac{S}{n^2} + \frac{I_n^2 V_s^2}{nS}\right)\right.$$

$$\left. + 8760 P_v U_u F_u \left[K_{CL} \left(S + \frac{V_s^2 I_n^2}{nS}\right) + 10^3 \left(\frac{S}{nQ} + \frac{I_n^2 V_s^2}{nSQ}\right)\right]\right\}$$

وبصورة مختصرة تكون التكاليف الكلية

$$T.\ Cost = U_T + AS + \frac{B}{S}$$

حيث :

U_u = تكاليف مفقودات القدرة / كيلووات ساعة

F_u = عامل انتفاع المرشح (Filter utilitization factor)

U_c = التكاليف التزايدية للمكثف / القدرة MVAr

U_L = التكاليف التزايدية للمفاعل / القدرة MVAr

U_T = التكاليف الثابتة الكلية لمكونات فرع المرشح .

حيث :

$$A = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right)\left\{U_c + \frac{U_L}{n^2} + 8760\, P_v\, U_u\, F_u \left(K_{CL} + \frac{10^3}{nQ}\right)\right\}$$

$$B = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right)\left(\frac{V_s^2 I_n^2}{n}\right)\left\{U_c + U_L + 8760\, P_v\, U_u\, F_u \left(K_{CL} + \frac{10^3}{Q}\right)\right\}$$

ويمكن الحصول على اقل التكاليف اذا تحقق الشرط الآتى :

$$\frac{d}{ds}\,(TCOST) = 0$$

اى نحصل على أقل التكاليف عندما

$$S_{Min} = \sqrt{\frac{B}{A}} \quad MVAr$$

٢ - مرشح الامرار النطاقى

مثل حالة مرشح التوليف الاحادى فان الاحمال عند التردد الاساسى وتردد التوافقيات تكون

$$S = \frac{V_s^2}{X_c}\left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1}\right) \quad MVAr \quad .... (3)$$

حيث n_o = النسبة بين تردد التوليف الى تردد المصدر

ونحصل على قدرة كل مرشح من تقدير التكاليف الآتية :

أ – للمكثف :

الاحمال الاساسية هى :

$$S\left[\frac{n_o^2}{n_o^2-1}\right] \quad MVAr$$

والاحمال عند التوافقية n هى

$$I_n^2\left(\frac{X_c}{n}\right)$$

وباستخدام المعادلة (3) نحصل على

$$\frac{1}{S}\;\frac{I_n^2}{n}\;\left(\frac{V_s^2\,n_o^2}{n_o^2-1}\right)$$

وبذلك فان الاحمال الكلية للتوافقيات تكون

$$\frac{1}{S}V_s^2\left(\frac{n_o^2}{n_o^2-1}\right)\sum_{n=n_{min}}^{max}\left(\frac{I_n^2}{n}\right) \quad MVAr$$

ب – للمفاعل :

لمرشح الامرار النطاقى تكون Q تبعاً للمعادلة :

$$Q=\frac{R}{X}$$

وبافتراض ان Q تساوى 1.5 فان :

$$R = 1.5\,X_o = 1.5\,n_o\,X_L$$

واذا كان المرشح يولف لتردد قريب من التوافقية السابعة عشر فان :

$$R \simeq 25\,X_L$$

وحيث ان :

$$I_c = I_L + j\,I_R$$

$$\therefore I_c \simeq I_L$$

وعلى ذلك فان الاحمال الاساسية هى :

$$I_L^2 X_L = \frac{I_C^2 X_C}{n_o^2}$$

$$= \left(\frac{S}{V_s}\right)^2 \left(\frac{V_s^2}{n_o^2 S}\right)\left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1}\right)$$

$$= \left(\frac{S}{n_o^2}\right)\left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1}\right) \qquad MVAr$$

وعند التوافقية n فان التيار I_L يكون

$$(I_L)_n = \frac{I_n R}{R + jX_L} = \frac{I_n Q}{Q + \frac{jn}{n_o}}$$

$$|(I_L)_n| = \frac{I_n Q}{\sqrt{\left(Q^2 + \left(\frac{n}{n_o}\right)^2\right)}}$$

وعند التوافقية n تكون X_L

$$(X_L)_n = X_o\left(\frac{n}{n_o}\right) = \left(\frac{n}{n_o}\right)\left(\frac{X_c}{n_o}\right)$$

$$= \left(\frac{n}{n_o^2}\right)\left(\frac{V_s^2}{S}\right)\left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1}\right)$$

وعلى ذلك فان الحمل عند التوافقية n يكون :

$$(I_L)_n^2 (X_L)_n = \frac{1}{S} Q^2 V_s^2 \left[\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1}\right]\left[\frac{n I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2}\right] \quad MVAr$$

والحمل الكلى للتوافقيات

$$\frac{1}{S} \quad Q^2 \; V_s^2 \; [\frac{n_o^{\;2}}{n_o^{\;2}-1}] \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} [\frac{n\, I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2}] \; MVAr$$

وتتكون مفقودات القدرة من ثلاثة أجزاء هى :

أ – مفقودات قدرة المكثفات وتساوى

$K_{CL} \cdot$ (total rating in KW)

ب – مقاومة التوالى للمفاعلة عند التردد الاساسى :

$$R_L = \frac{X_o}{Q_L} = \frac{n_o}{Q_L} \; X_L$$

حيث Q_L عامل الكمية للمفاعل ، فتصبح مفقودات القدرة نتيجة R_L هى :

$$I_L^2 \, R_L = \frac{n_o}{Q_L} \; (MVAr\ loading)$$

$$= \frac{S}{n_o \, Q_L} \; (\frac{n_o^{\;2}}{n_o - 1}) \; \ldots\ldots\ldots\ldots \; MW$$

وتكون مفقودات القدرة للتوافقيات هى:

$$\sum (I_L)_n^2 (R_L)_n = \frac{1}{S} \; \frac{Q^2 \, V_s^2 \, n_o}{Q_L} \; (\frac{n_o^{\;2}}{n_o^2 - 1}) \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} (\frac{I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2}) \; MW$$

جـ – يعبر عن مفقودات القدرة فى مقاومة التوازى R كجزء من حمل المفاعل ، وعلى ذلك فان المقاومة عند التردد الاساسى تكون :

$$R = Q \, X_o = Q \, n_o \, X_L$$

$$|I_R| = \frac{|I_L| \, X_L}{R} = \frac{I_L \, X_L}{Q \, n_o \, X_L} = \frac{I_L}{Q \, n_o}$$

ويكون فقد القدرة :

$$I_R^2 \, R = \frac{1}{Q n_o} \; I_L^2 \, X_L$$

$$= \frac{1}{Qn_o} \ (MVAr\ loading)$$

$$= \frac{S}{Qn_o^3} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) x\ 10^{3} \quad KW$$

وعند التوافقية n يكون I_R كالآتى :

$$/ (I_R)_n / = / (I_L)_n / \left(\frac{X_L}{R} \right)$$

وعلى ذلك فان الفقد فى القدرة يكون :

$$\sum (I_R)_n^2 (R)_n = \frac{1}{S} \frac{Q^2 V_s^2}{n_o} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{n^2 I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right) X\ 10^{3}$$

وباستخدام الطريقة نفسها المستخدمة فى مرشح التوليف الاحادى للحصول على التكاليف الكلية فان :

$$TCOST = U_T + AS + \frac{B}{S}$$

حيث

$$A = \left\{ U_c + \frac{U_L}{n_o^2} + 8760\, P_v\, U_u\, F_u \left(K_{CL} + \frac{10^3}{Q_L\, n_o} + \frac{10^3}{Q\, n_o^3} \right) \right\} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right)$$

$$B = \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) V_s^2 \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} I_n^2 \left\{ \left(\frac{U_L}{n} + \frac{Q^2 U_L n}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right) + 8760\, P_v\, U_u\, F_u \right.$$

$$\left. \left(\frac{K_{CL}}{n} + \frac{Q^2 n_o x 10^3}{Q_L (Q^2 n_o^2 + n^2)} + \frac{Q n^2 x 10^3}{n_o (Q^2 n_o^2 + n^2)} \right) \right\}$$

ونحصل على اقل التكاليف عندما

$$S_{Min} = \sqrt{\frac{B}{A}} \quad MVAr$$

العلاقة بين معاوقة المدخل والتردد لشبكة تحتوى على مرشح

لقد اوضحنا فى الباب الرابع كيفية الحصول على معاوقة المدخل لشبكة كهربائية كدالة فى درجة التوافقية (n) ، وفى هذا الجزء سنوضح استجابة التردد *(Frequency response)* عند اضافة مكثف ومفاعل للشبكة .

بملاحظة الشكل (٢٧-٧) أ نجد شبكة مكونة من مبدل ٦ نبضات (مصدر التوافقيات) ـ مكثف قدرة - محركات - مولدات موضعية ... وتمثل جميع مكونات الشبكة ، فيما عدا المكثف ، بمعاوقة المدخل Z_i اى ان

$$Z_i = R + jL$$

وعلى ذلك يوزع تيار التوافقيات I_n بين معاوقة المدخل والمكثف كما فى شكل (٢٧-٧) ب . وتكون كل من معاوقة المدخل ومعاوقة المكثف دالة فى درجة التوافقية ، وبرسم العلاقة بين المعاوقة الكلية Z_n ، محصلة التوازى بين معاوقة المدخل ومعاوقة المكثف ، كنسبة من المعاوقة الاساسية Z_1 ودرجة التوافقية n نحصل على العلاقة الموضحة بشكل (٢٧-٧) جـ ، والتى تبين حدوث تردد الرنين f_p عند اقصى قيمة للمعاوقة الكلية والتى تحدث عندما تتساوى معاوقة المدخل مع معاوقة المكثف :

$$Z_{1n} = Z_{cn}$$

عند التردد f_p والذى يساوى

$$f_p = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{LC}}$$

وعند اضافة مفاعل على التوالى مع المكثف ، كما فى شكل (٢٨-٧) أ تصبح العلاقة بين n , Z_n كما فى شكل (٢٨-٧) ب ويحتوى المنحنى على نقطتى التردد الآتيتين :

$$f_r = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L_f\,C}} \qquad at \qquad Z_{Ln} = Z_{cn}$$

$$f_p = f_r\,\frac{1}{1 + (\,L_s\,/\,2L_f)} \qquad at \qquad Z_{in} = Z_{cn}$$

وعلى ذلك يمكن تلخيص ذلك فى الآتى :

- تمثل جميع مكونات الشبكة ، عند قضبان الربط المشترك *pcc* ، بمعاوقة المدخل والتى تكون على التوازى مع المرشح كما فى شكل (٢٩-٧) أ .

- يكون تردد التوليف عند $Z_L = Z_c$ كما فى شكل (٢٩-٧) ب .

- يكون تردد رنين التوالى عند $Z_i = Z_c$ كما فى شكل (٢٩-٧) جـ .

- وتكون العلاقة بين Z الكلية (عند قضبان الربط المشترك *pcc*) ودرجة التوافقية n كما فى شكل (٢٩-٧) ء .

مثال(٣-٧)

بالرجوع الى مثال (١-٤) بالباب الرابع ، والموضح بشكل (٣٠-٧) ، حيث تم توصيل مكثف *6MVAr* لتحسين معامل القدرة على قضبان الربط المشترك *(pcc)* المتصل عليها مبدل ٦ نبضات (مصدر تيار التوافقيات) - احسب قيمة محاثة المفاعل لمرشح توليف التوافقية الخامسة مع رسم العلاقة بين معاوقة المدخل ، فى هذه الحالة،ودرجة التوافقية n .

الحل :

قدرة المكثف = *6 MVAr*

الجهد = *11 Kv*

$$X_{c(p.u)} = - \frac{MVA_b}{MVA_c}$$

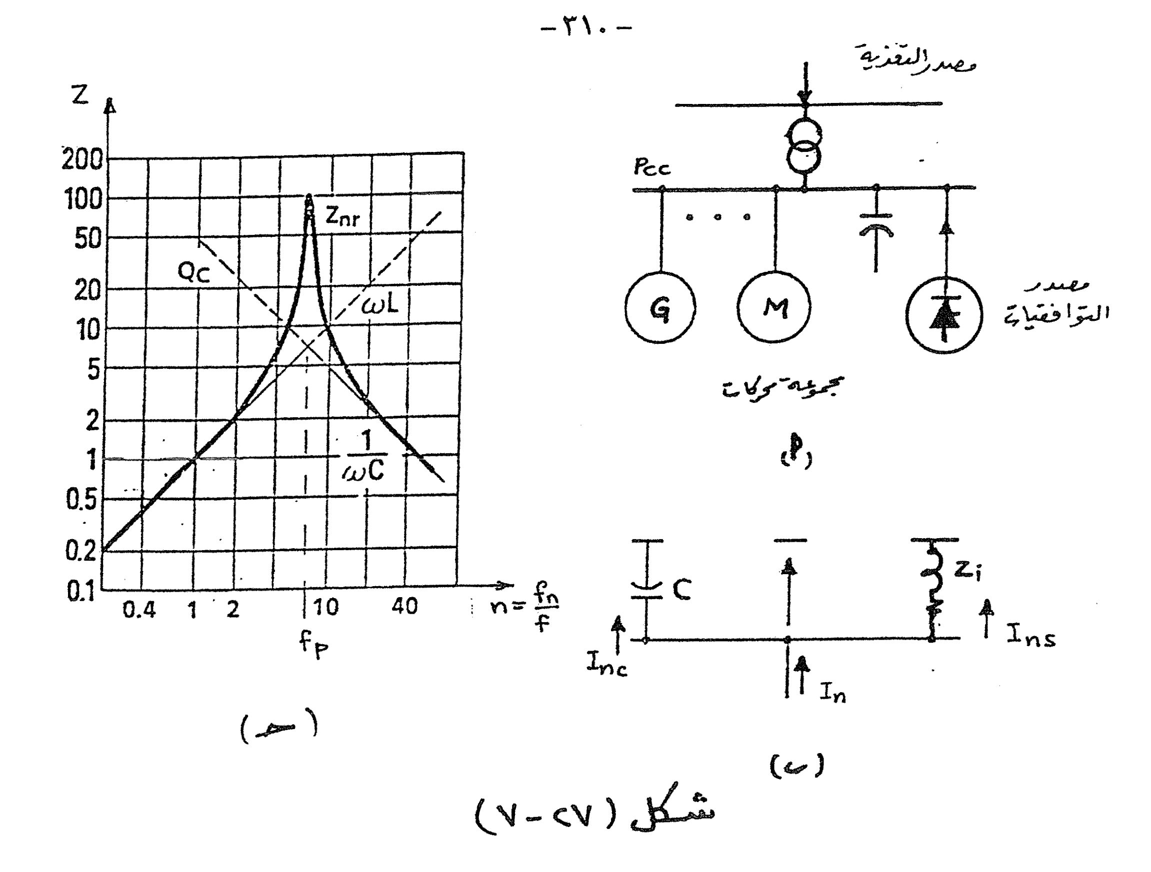
$$= - \frac{100}{6} = - 16.667 \; p.u$$

وتكون معاوقة المكثف عند تردد التوافقيات هى

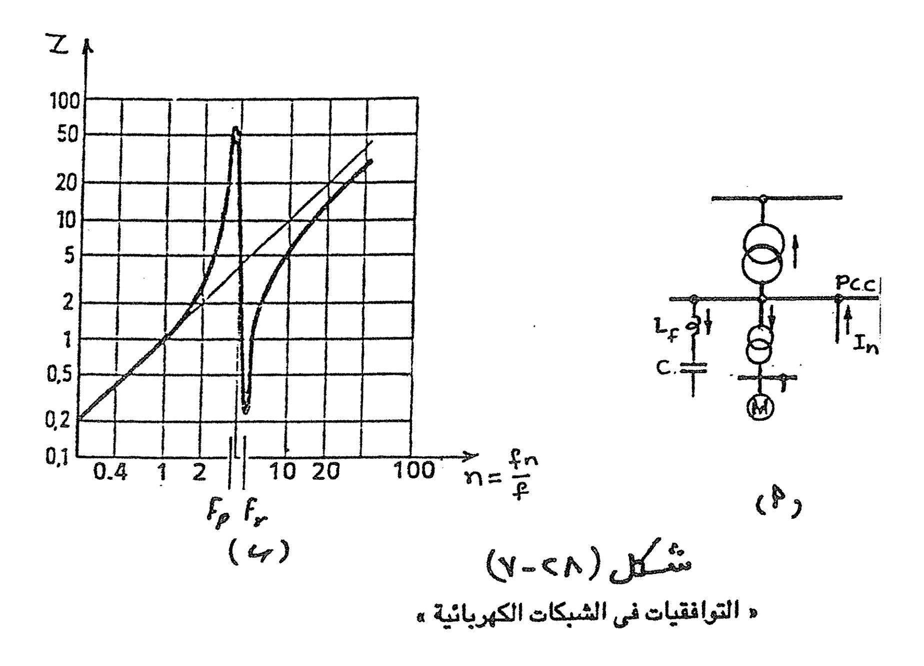
$$X_{cn} = \frac{X_c}{n}$$

وممانعة المكثف عند التردد الاساسى

$$X_c = \frac{(KV)^2}{MVAr} = \frac{(11)^2}{6} = 20.1666 \; \Omega$$



شكل (٧-٢٧)



شكل (٧-٢٨)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

وتكون ممانعة المفاعل عند التردد الاساسى

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} = \frac{20.1666}{(5)^2} = 0.8066\ \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$X_{L(pu)} = \frac{16.667}{25} = 0.6666\ p.u$$

وبافتراض ان المفاعل من الالومنيوم وله ثابت $Q = 50$

$$Q = \frac{X}{R} = 50$$

$$R = \frac{X}{50} = \frac{0.6666}{50} = 0.01333\ p.u$$

ثم نحسب الآتى :

١ – معاوقة المكثف عند تردد التوافقيات :

درجة التوافقية	X_{cn}
1	-16.666
2	-8.333
3	-5.555
4	-4.1665
5	-3.3332
6	-2.7776
7	-2.3808
8	-2.08325
9	-1.85177
10	-1.6666
11	-1.5151
12	-1.3888
13	-1.2820

٢ – معاوقة المفاعل عند تردد التوافقيات :

n	عامل الضرب للمقاومة	عامل الضرب للممانعة	R_{Ln}	X_{Ln}
1	1	1	0.0133	0.6666
2	1.3094	2	0.0174	1.3332
3	1.8251	3	0.0243	1.9998
4	2.5471	4	0.0339	2.6664
5	3.4753	5	0.0462	3.3330
6	4.6098	6	0.0613	3.9996
7	5.9506	7	0.0792	4.6662
8	7.4977	8	0.0997	5.3328
9	9.2511	9	0.1231	5.9994
10	11.2107	10	0.1491	6.6660
11	13.3766	11	0.1779	7.3326
12	15.7488	12	0.2095	7.9992
13	18.3273	13	0.2437	8.6658

٣ – ثم نحصل على محصلة معاوقة المكثف والمفاعل على التوالى :

n	$R_{L,C}$	$X_{L,C}$	$Z_{L,C}$
1	0.0133	-16	16
2	0.0174	-7	7
3	0.0243	-3.5552	3.5522
4	0.0339	-1.5001	1.5005
5	0.0462	0.000	0.0462
6	0.0613	1.222	1.2235
7	0.0792	2.2854	2.2868
8	0.0997	3.2495	3.2511
9	0.1231	4.1476	4.1494
10	0.1491	5.000	5.0022
11	0.1779	5.8175	5.8202
12	0.2095	6.6104	6.6137
13	0.2437	7.3838	7.3878

٤ – نحسب محصلة التوازى للمعاوقتين $Z_{L,C}$, Z_{eq}

n	$Z_{L,C}$	Z_{eq}	$Z_{L,C} // Z_{eq}$
1	16	0.3809	0.3720
2	7	0.6840	0.6231
3	3.5552	0.9892	0.7739
4	1.5005	1.3127	0.7002
5	0.0462	1.6671	0.0449
6	1.2235	2.0748	0.7696
7	2.2868	2.6366	1.2246
8	3.2511	3.6277	1.7145
9	4.1494	6.7874	2.5751
10	5.0022	5.1335	2.5335
11	5.8202	1.5386	1.3018
12	6.6137	2.0518	1.5659
13	7.3878	2.4935	1.8642

عند تسجيل العلاقة بين $X_{L,C}$, $R_{L,C}$ للمرشح نحصل على العلاقة بشكل (٣١-٧) ونلاحظ حدوث التقاطع عند تردد التوافقية الخامسة .

ويوضح شكل (٣٢-٧) العلاقة بين $Z_{L,C}$ للمرشح ودرجة التوافقية n ونلاحظ ان تردد التوليف عند درجة التوافقية الخامسة .

كما يوضح شكل (٣٣-٧) العلاقة بين Z الكلية للشكل (٣٠-٧) ودرجة التوافقية n ومنه نجد الآتى :

- تردد التوليف (f_r) عند درجة التوافقية الخامسة .
- تردد رنين التوازى (f_{p1}) عند درجة التوافقية ٣,٨
- تردد رنين التوازى (f_{p2}) عند درجة التوافقية ٩,٦

ويوضح شكل (٢٤-٧) العلاقة بين Z الكلية للشبكة بشكل (٣٠-٧) قبل وبعد تركيب مرشح توليف الدرجة الخامسة ويلاحظ الآتى :

- المعاوقة عند $n=5$ اصبحت تساوى صفر بعد تركيب المرشح .
- انخفاض المعاوقة عند تردد الرنين f_{p1} .
- ازاحة وانخفاض المعاوقة عند تردد الرنين f_{p2} .

ويفضل عند تصميم مرشح التوليف الاعتبارات الآتية :

١ - اختيار المرشح بحيث نحاول ابعاد تردد الرنين عن تردد التوافقيات الموجودة بالشبكة فمثلاً فى حالة وجود مصدر تيار التوافقيات الخامسة والسابعة بالشبكة فيجب ابعاد تردد الرنين عن هذين الترددين .

٢ - يتم اختيار اكثر من تردد توليف للمرشح ونرسم العلاقة بين Z,n للشبكة عند كل تردد توليف للمرشح ونختار الافضل والذى يؤدى الى تقليل قيمة المعاوقة عند تردد الرنين الى اقل ما يمكن كذلك تقليل معاوقة تردد التوافقيات الموجودة بالشبكة تحت الدراسة ويمكن احياناً بعد عمل مقارنة بين الاختيارات المختلفة نجد انه من الافضل عدم تركيب مرشح .

٣ - يتم توليف المرشح عند او اقل قليلاً من اقل درجة توافقية ناتجة من مصدر

التوافقيات ، فمثلاً لمبدل ٦ نبضات تكون اقل توافقية يصدرها هى 5^{th} ، لذلك يولف المرشح بين 4.7^{th} , 5^{th} .

ملاحظات :

١ – عند وجود اكثر من مصدر للتوافقيات عند *pcc* فان تيارات وجهود التوافقيات تجمع اتجاهياً وتكون قيمة جذر متوسط المربعات لجهود وتيارات المصادر المختلفة للتوافقيات كالاتى :

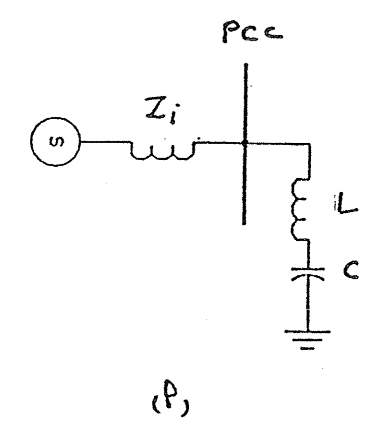
$$V = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + ...)^{1/2}$$
$$I = (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + ...)^{1/2}$$

٢ – اذا كانت المجموعة الاتجاهية لمحول المبدل دلتا / دلتا فان تيارات التوافقيات الخامسة والسابعة المارة بالملفات الابتدائية والثانوية لايوجد بينها زاوية ازاحة *(phase shift)* .

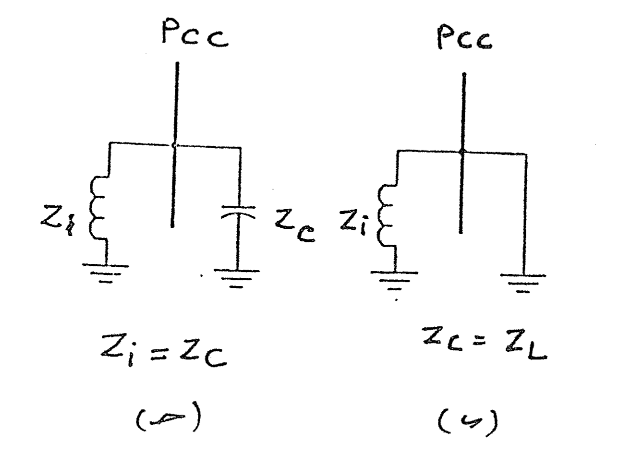
٣ – اذا كانت المجموعة الاتجاهية لمحول المبدل دلتا / نجمة فتوجد بذلك زاوية ازاحة بين تيار التوافقية الخامسة بالملفات الثانوية و الابتدائية بقيمة $5 X 30^o$ اى 150^o بينما نجدها فى حالة تيار التوافقية السابعة بقيمة $7x 30^o$ اى 210^o .

٤ – يجب اختيار قيمتى القدرة والفولت اى KVA_b , KV_b كقاعدة *(base)* للحصول على التيار الاساسى I_b من العلاقة :

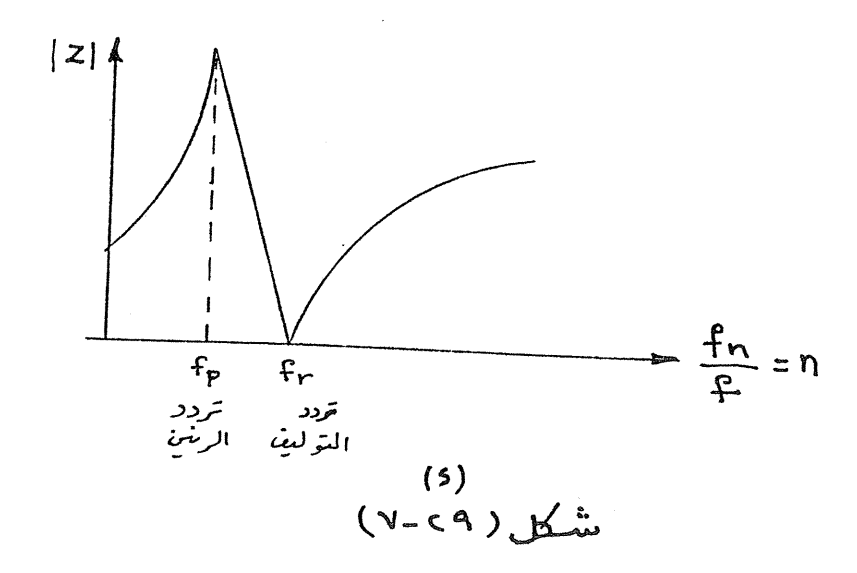
$$I_b = \frac{KVA_b}{\sqrt{3}\,(KV_b)}$$



Pcc
Zi
S
L
C
(أ)

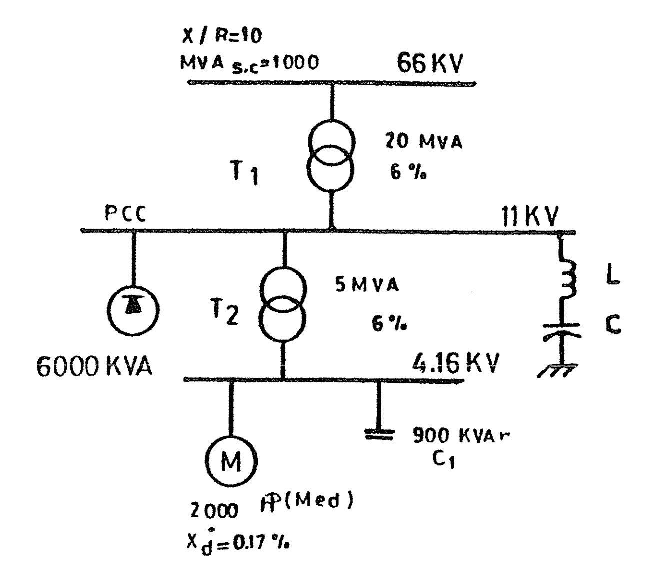


Pcc
Pcc
Zi
Zc
Zi
Zc = ZL
Zi = Zc
(ب)
(ج)

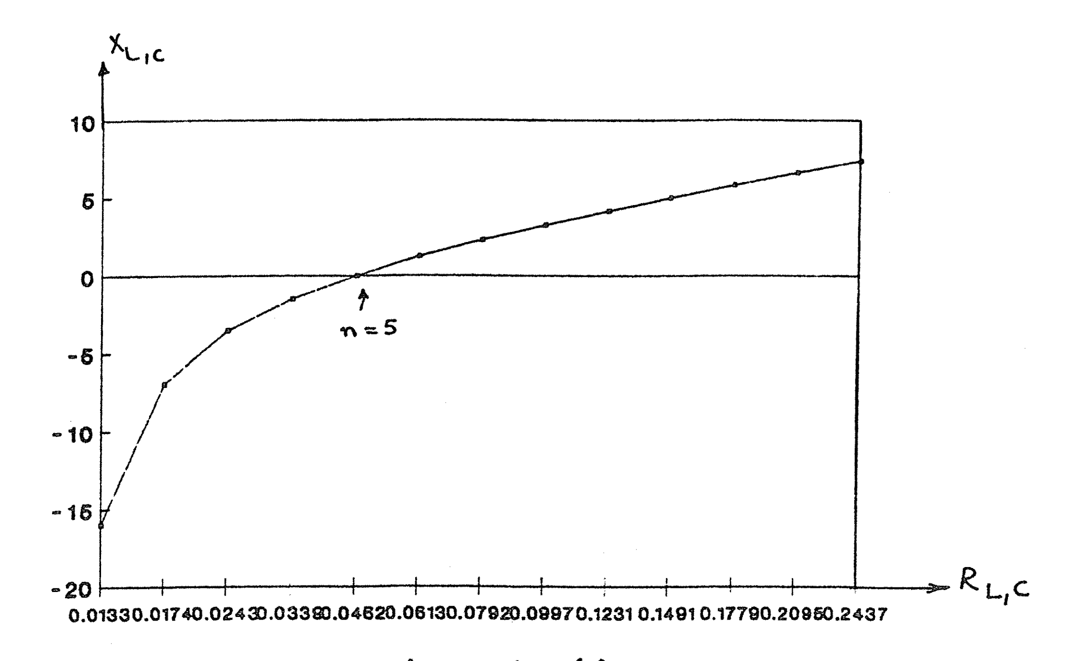


|Z|
fp
fr
fn/f = n
تردد الرنين
تردد التوليف
(د)

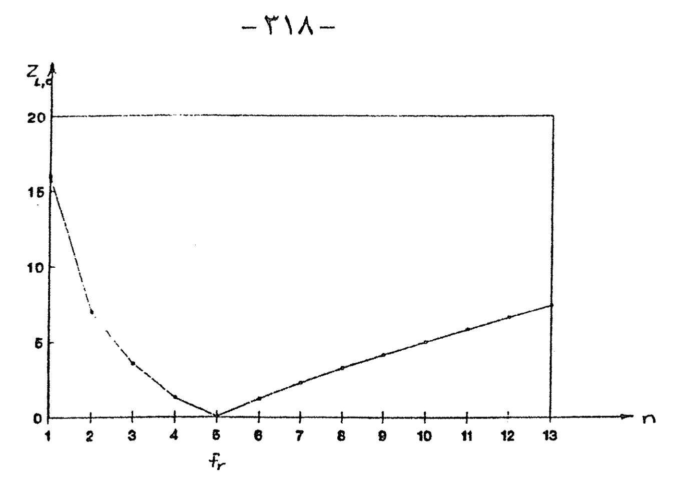
شكل (٩-٧)



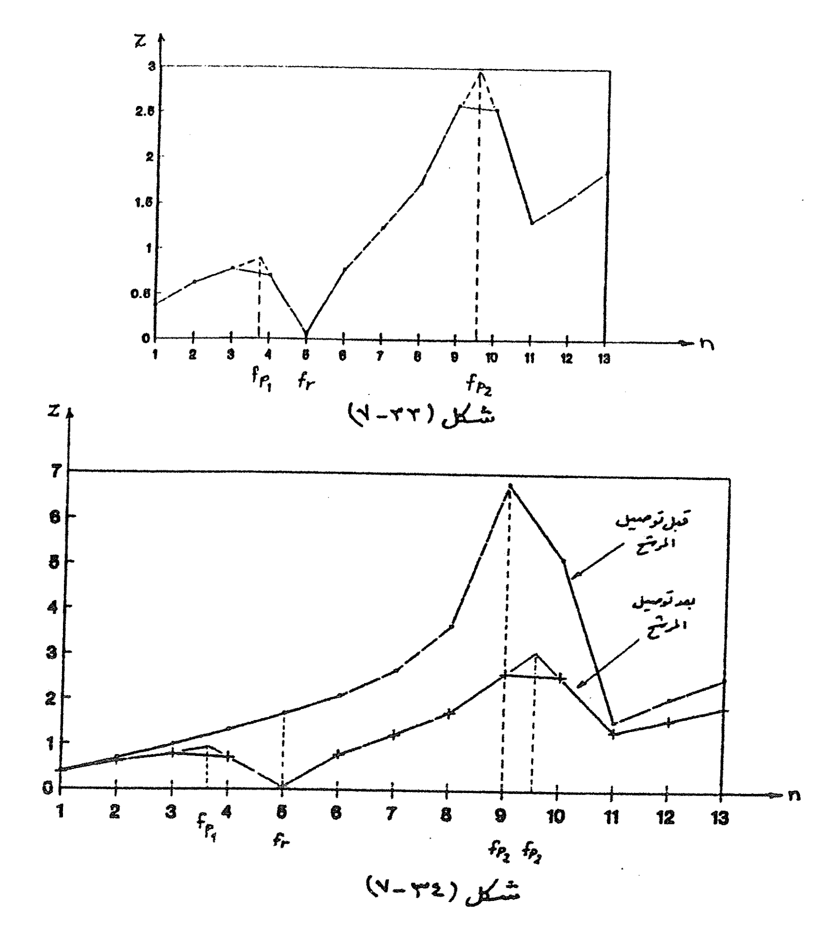
شكل (٣٠-٧)



شكل (٣١-٧)



شكل (٣٢-٧)



شكل (٣٣-٧)

شكل (٣٤-٧)

References

1 - Advanced problems in Electrical Engineering

M.K.S.A. Systems

B.L. THERAJA

2 - Electrical Power Equipment and measurements with heavy current electrical applications

Alan Symonds

3 - Electrical measuring instruments and measurements .

By B.E.F. KARSA.

4 - Principels of Electrical measurments

H.Buckingham , E.M. Price

5 - Basic electrical engineering

A. Kasatkin

M. Perekalin

6 - Electrical Power Utilization

N.N. HANCOCK

7 - Distribution System

Electrical utility engineering reference book.

Westinghouse

8 - Theory of Alternating Current Machinery

Alexander S. Longsdrof

9 - Electrical Distribution Engineering

Anthony J. Pansini

10 - Electronic Instrumentation and measurments

David A. Bell

11 - Standard Handbook for Electrical Engineering

Donald G. Fink

H. Woyne Beaty

12 - Power System Harmonics

J. ARRILLAGA

D.A. BRADLEY

P.S. BODGER

13 - Electrical Distribution Network design

IEE Power engineering series 9

E. Lakervi & E.J . Holmes

14 - IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-Power system harmonics : An overview .

15 - IEEE Transaction on Power Delivery , Vol.8, No.1. January 1993

A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus .

16 -Mathematical Statistics

J. N. KAPUR

H.C. SAXENA

17 - Electrical Engineering Handbook

SIEMENS

18 - Handbook of Electrical Engineering

S.L. BHATIA & KHANNA PUBLISHERS

19 - *Applied Electronic Instrumentation and Measurements .*

DAVID BUCHLA

WAYNB McLACHLAN

20 - *CIRCUTOR*

Control and measuring equipment

1992 REF. C - Mol. F - GB

21 - *Effect of Harmonics on Power Factor Correction systems .*

Dr. M. SHAKER

SHAKER Consultancy Group

22 - *Harmonic Measurments in Power Systems Using A Low Cost Instrument .*

A. Marani , E. Mazzoni .... Italy.

23 - *IEEE Guide For harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters , IEEE std. 519 - 1981 .*

24 - *Duffey & Stratford . Update of Harmonic standard IEEE-519 : IEEE Recomended practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems .*

IEEE Transactions on Industry Applications , Vol. 25, No. 6 , November / December . 1989.

25 - *FFT Alogrithms For the Harmonic Analysis of Three - phase Transformer Banks with Magnatic Saturation*

IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 6, No. 1 , January 1991.

26 - *Compensation Systems for Industry*

E. Wanner, R Mathys and M. Housler, Baden Brown Boveri Rev. 9/10 - 83

27 - IEC 555 (1982)

Disturbances in Supply systems caused by Household

Applicances and Similar Electrical Equipment .

555 - 1 (1982) Part 1 : Definitions

555 - 2 (1982) Part 2 : Harmonics

28 - Elcontral

Power in Control

Electrical Energy Analyzers and measuring Instruments

29 - Systems Innovations

Focusing on Creative Problem Solving for the Power Industry . GE . Vol. 7. No. 2 November 1993

30 - A new generalized concept for the design of thyristor phase - controlled Var compensators

Part 1 : Steady state performance

Part 2 : Transient Performance .

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98 , No.1 Jan/Feb 1979

31 - Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers

IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 6 , No.1,Jan 1991

32 - Rectifier - Loaded Synchronous generators with damper windings

Proc. IEE, vol. 120, No.6 , June 1973

33 - Reactive Power Compensation in Transmission Systems

ASEA 5 - 721 83 VASTERAS Sweden

Power System Consullting Department .

34 - On The Harmonic Compensation in nonsinusoidal systems .

IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 8 , No. 1, Jan 1993

٣٥ - الالكترونيات الصناعية ووسائل التحريك الكهربى

د.م. محمد احمد قمر .

٣٦ - المحولات الكهربائية ـ الجزء الثانى

د. م .: كاميليا يوسف محمد

٣٧ - المحولات الكهربائية والآت التيار المستمر .

د. م. : محمد احمد قمر .

للمؤلفة :

١- المكثفات وتحسين معامل القدرة

٢- المحولات الكهربائية - الجزء الأول

٣- المحولات الكهربائية - الجزء الثانى

٤- الوقاية في الشبكات الكهربائية - الجزء الأول

٥- التوافقيات في الشبكات الكهربائية

٦- جودة التغذية الكهربائية

٧- الأضاءة وتوفير الطاقة

٨- الوقاية في الشبكات الكهربائية - الجزء الثانى

٩- إدارة طلب الطاقة وفرص ترشيد استخدام الطاقة في المنشآت الصناعية والتجارية - الجزء الأول

١٠- البيئة - الطاقة وغازات الاحتباس الحرارى

١١ - إدارة طلب الطاقة - الجزء الثانى .

١٢ - اضطرابات جودة التغذية الكهربائية .

١٣ - ارشادات لوسائل التوعية لترشيد استخدام الطاقة .

١٤ - ٧٥ فرصة لترشيد استخدام الطاقة .

١٥ - الفقد فى الطاقة الكهربائية .

رقم الايداع بدار الكتب القومية
٥٥١١ / ٩٤
I.S.B.N 977 - 5322 - 01 - 4

دار الجامعيين



لطباعة الأوفست والتجليد
ت: ٤٨٦٢٠٠٤ - ٠١٢٢٢١٣٧٠٩

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »